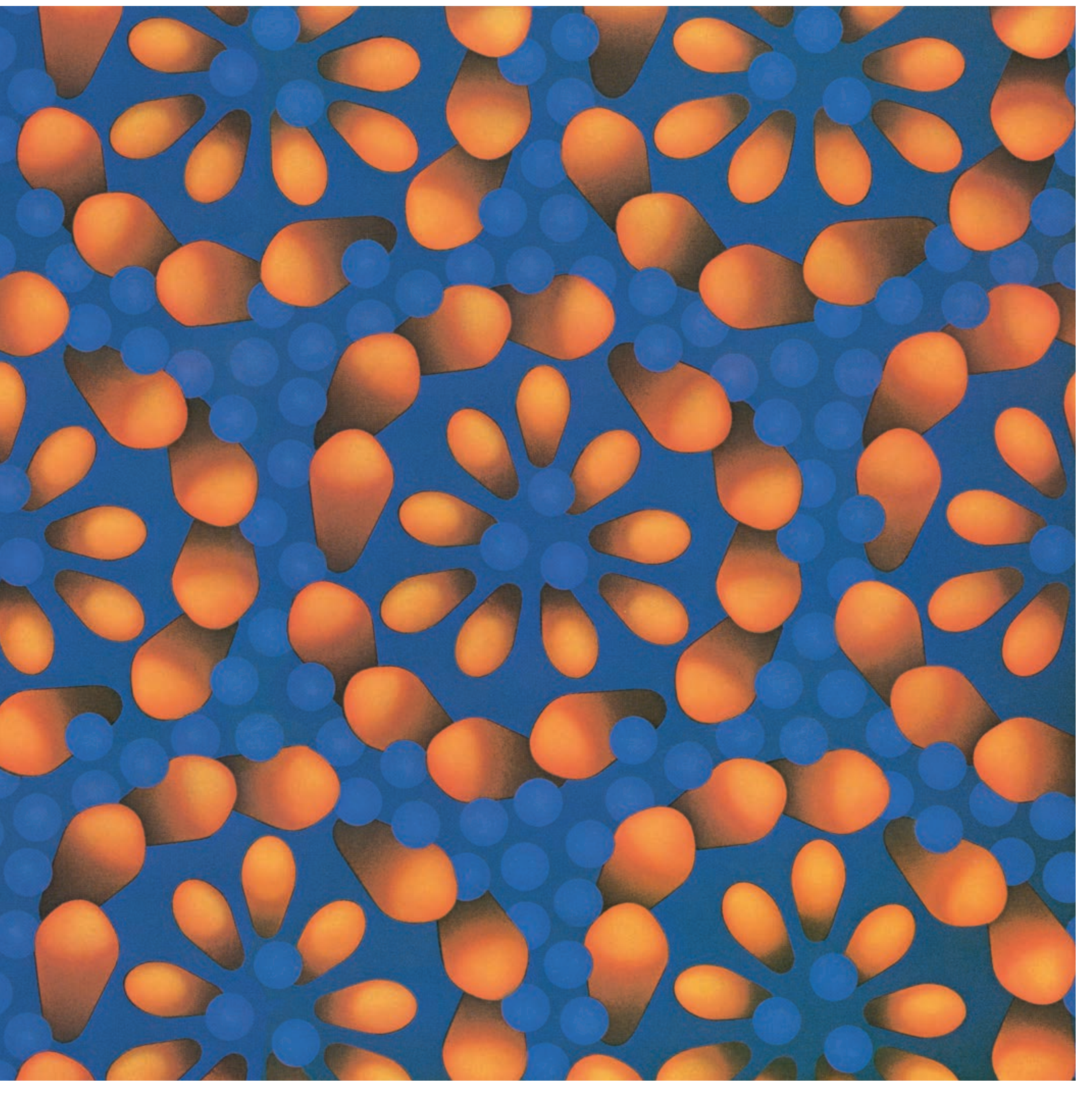
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



PROTEINAS DE MEMBRANAS CELULARES

Abril 1984

350 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 91
Abril 1984

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Mireia Bofill: *La población china*; Manuel Puigcerver: *Orbita terrestre y períodos glaciales*; Juan C. Gómez Fernández: *Proteínas de membrana*; Emilio Gelpí: *Espectroscopía de gases sobreenfriados*; José Luis Melena: *Números y medidas en los primeros documentos escritos*; Joandomènec Ros: *Abejas solitarias*; Ramón Gago: *La invención del globo aerostático y el nacimiento de la química*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Manuel Ballester Boix y Victoria Gracia

Libros:

Juan José Acero, F. J. de la Rubia, Manuel G. Velarde, J. L. Peset, A. Lafuente, Luis Alonso y Pedro Molera



LA PORTADA

El dibujo de la portada es una representación artística de un fragmento de membrana celular: la de los organismos halófilos llamados halobacterias. Se compone la membrana de una bicapa lipídica en la que están implantadas moléculas de la proteína bacteriorrodopsina (*en naranja*). La configuración de la bacteriorrodopsina se ha establecido mediante el análisis de difractogramas electrónicos y micrografías electrónicas (véase "Proteínas de membrana", por Nigel Unwin y Richard Henderson, en este número). La perspectiva de la ilustración es perpendicular a la superficie de la membrana, por lo que sólo se distinguen las cabezas de las moléculas lipídicas, dibujadas esquemáticamente como pequeñas esferas azules; las dos largas colas hidrocarbonadas de cada molécula se prolongan hacia el interior de la membrana. Los objetos naranja son hélices alfa de la bacteriorrodopsina. Una molécula de esa proteína consta de siete hélices, tres de ellas perpendiculares al plano de la membrana y cuatro inclinadas.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 37

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 3.850 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números): 52 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España

Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49 - Barcelona-10

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:

Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - Madrid-30
Tel. 430 84 81

Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - Barcelona-34
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de George V. Kelvin

Página	Fuente
8-9	Andrew Tomko
10-16	Albert E. Miller
17	Nathan Keyfitz, Universidad de Harvard
21-23	Ricardo Génova y Antonio Ruiz Bustos
24-25	Antonio Ruiz Bustos
26	Ricardo Génova y Antonio Ruiz Bustos
27	Antonio Ruiz Bustos (*arriba*); Ricardo Génova y Antonio Ruiz Bustos (*abajo*)
28	Antonio Ruiz Bustos
31-38	Andrew Tomko
42	Juan Cotoner y Manuel Ballester
47	Richard Henderson, Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigación Médica
48-49	George V. Kelvin
50	Richard Henderson, Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigación Médica (*arriba*); Nigel Unwin, Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford y Richard Henderson, Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigación Médica (*abajo*)
51	Nigel Unwin, Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford
52	George V. Kelvin
53-54	Nigel Unwin, Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, y Richard Henderson, Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigación Médica
55-56	George V. Kelvin
59	Fritz Goro
60-66	Allen Beechel
69	Museo Británico
70-74	Alan D. Iselin
75	Vincent Scheil
76	Alan D. Iselin
79-86	Tom Prentiss
89-91	Colección Granger
92	Colección de Historia Aeronáutica Coronel Richard Gimbel, Biblioteca de la Academia de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos
94-97	Colección Granger
98	R. F. Bonifield
99-105	Ilil Arbel
106-109	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Napoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

NATHAN KEYFITZ ("La población china") es profesor emérito de la cátedra Andelot de sociología de la Universidad de Harvard y catedrático honorario de demografía social de la Universidad estatal de Ohio. Dirige el programa demográfico del Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas de Laxenburg, Austria. Se licenció en matemáticas por la Universidad McGill y se doctoró en sociología por la de Chicago. Tras colaborar con la administración pública canadiense, para la que fue investigador estadístico, se incorporó a la vida académica. Enseñó también en las universidades de Toronto, Chicago, de California en Berkeley y, en fecha más reciente, ha impartido cursos en el departamento de medicina preventiva y bioestadística de Toronto. En 1982, Keyfitz realizó una detenida visita a China, sobre la cual esta basado en parte su artículo.

ANTONIO RUIZ BUSTOS ("El yacimiento paleontológico de Cúllar de Baza-I") se licenció en geología y biología por la Universidad de Granada, por la que obtuvo el doctorado con premio extraordinario en 1976. Allí ejerció, durante nueve años, su labor docente e investigadora a través de los departamentos de zoología, paleontología y prehistoria. Becario en el Laboratorio de evolución de los vertebrados de la Universidad de Montpellier, ha colaborado con el Laboratorio de paleontología de la Universidad Católica de Lovaina y con los institutos Lucas Mallada y Jaime Almera, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Se ha ocupado de la sistemática y evolución de los mamíferos cuaternarios de las Cordilleras Béticas. Realiza su labor investigadora en el Instituto de Geología del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid.

CURT COVEY ("Orbita terrestre y períodos glaciales") es profesor adjunto del departamento de meteorología y oceanografía física de la Universidad de Miami. Cursó estudios de biología en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, que prosiguió en la Universidad de California en Santa Bárbara. En 1982 se recibió de doctor en geofísica por la Universidad de California en Los Angeles. La atmósfera de Venus constituía entonces su principal tema de investigación, y sobre ella escribió, en colaboración con Gerald Schubert, un artículo para INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (septiembre de 1981). En 1982 y 1983, fue becario del Centro Nacional de Investigación Atmosférica. En él trabajó sobre el uso de isótopos de oxígeno en el estudio de climas pasados y en los efectos a largo plazo de la guerra nuclear deducidos de un modelo de la circulación general atmosférica.

NIGEL UNWIN y RICHARD HENDERSON ("Proteínas de membrana") son, respectivamente, profesor de biología estructural de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford e investigador del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigación Médica de Cambridge. Unwin nació en Inglaterra, pero se crió en Nueva Zelanda, licenciándose en ingeniería metalúrgica por la Escuela de Minas de Otago. Se doctoró en metalurgia por la Universidad de Cambridge, en 1968. Posteriormente ingresó en el Laboratorio de Biología Molecular, donde comenzó a trabajar con Henderson en la aplicación de la microscopía electrónica de bajas dosis a la estructura de las proteínas de las membranas biológicas. En 1980 aceptó una plaza docente en la Facultad de Medicina de Stanford. Henderson se licenció en física por la Universidad de Edimburgo y en su doctorado trabajó sobre la estructura de moléculas enzimáticas con David Blow, en el Laboratorio de Biología Molecular. Tras pasar tres años en la Universidad de Yale, regresó al Laboratorio de Biología Molecular, donde ha trabajado fundamentalmente sobre el tema del presente artículo: la determinación de la estructura de las proteínas de membrana por difracción de rayos X y microscopía electrónica.

DONALD N. LEVY ("Espectroscopía de gases sobreenfriados") es profesor de química del Instituto James Franck de la Universidad de Chicago. Licenciado por la Universidad de Harvard, en 1961, se doctoró, en 1965, por la de California en Berkeley. De 1965 a 1967 trabajó sobre química teórica en la Universidad de Cambridge. Levy se unió al claustro de Chicago en 1967 y enseña química desde 1978.

JÖRAN FRIBERG ("Números y medidas en los primeros documentos escritos") es profesor de matemáticas de la Universidad Técnica Chalmers de Göteborg, Suecia. Se doctoró en matemáticas por la Universidad de Lund en 1963; viene ejerciendo en Chalmers desde 1967. Su investigación se centró al principio en las ecuaciones diferenciales parciales y en la teoría de la aproximación. Al impartir unas clases a estudiantes de carreras humanísticas sobre una tabla babilónica de soluciones a la ecuación pitagórica, se le despertó la curiosidad por conocer la finalidad de dicha tabla y el modo de su construcción. En la actualidad se encuentra "imbuido por entero en mi investigación sobre la historia de las matemáticas cuneiformes".

SUZANNE W. T. BATRA ("Abejas solitarias") investiga en el campo de la entomología. Trabaja para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Se graduó en zoología por el Swarthmore College y se doctoró por la Universidad de Kansas. Tras colaborar con la Universidad Agrícola de Punjab y la Universidad estatal de Utah, se incorporó al Departamento de Agricultura en calidad de consejera de entomología, en 1970. Uno de sus principales campos de estudio es la identificación de insectos con actividades beneficiosas para la humanidad; entre ellos se cuentan las abejas solitarias. Está casada con Lekh R. Batra, micólogo que trabaja asimismo para el Departamento de Agricultura.

ARTHUR F. SCOTT ("La invención del globo aerostático y el nacimiento de la química") era catedrático jubilado de química del Reed College al sobrevenirle la muerte, en 1982. Licenciado por el Colby College, en 1919, se doctoró en química por la Universidad de Harvard en 1924. Ejerció primero en la Facultad de Reed, se trasladó al Instituto Rice. Volvió a Reed en 1937, en calidad de jefe del departamento de química, cargo que desempeñó hasta 1965. Inició su actividad científica en la determinación de los pesos atómicos de los elementos. En la década de 1950 se interesó por la química de los elementos radiactivos y colaboró en la construcción del primer laboratorio radioquímico en un hospital de Portland. Ya avanzada su vida centró su interés en la historia de la química. Dejó escrito al morir un trabajo sobre el tema del presente artículo, cuyo manuscrito preparó para su publicación Joel Keizer, de la Universidad de California en Davis, antiguo discípulo suyo.

Hace...

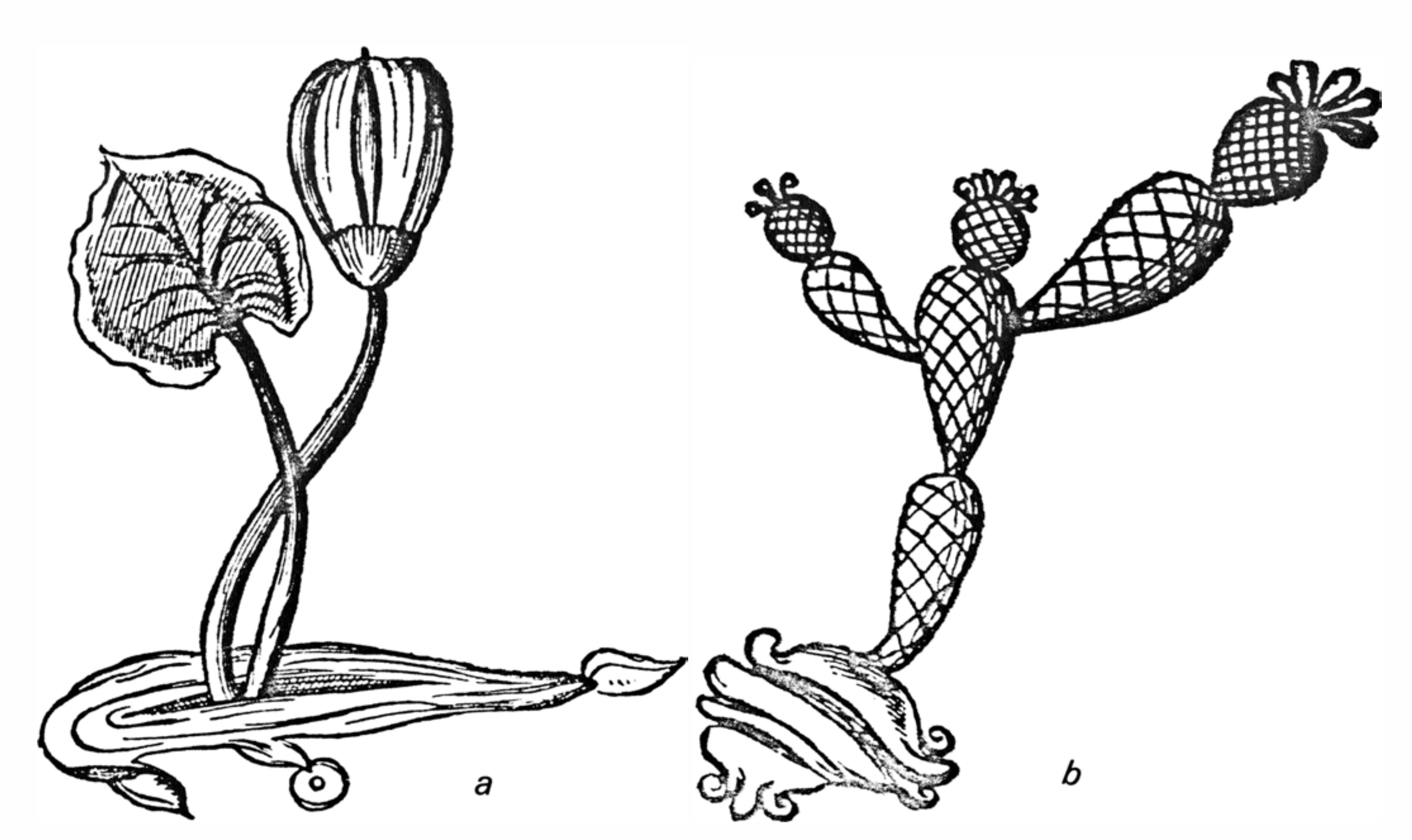
José M.ª López Piñero

... trescientos cincuenta años

Juan Eusebio Nieremberg publicó su *Prolusión a la dotrina y historia natural, que hizo el primer día que leyó en los Estudios Reales del Colegio Imperial en la Corte de Madrid.*

Nieremberg había nacido en Madrid hacia 1595, en el seno de una familia de nobles alemanes al servicio de María de Austria, hija de Carlos I. Estudió en el Colegio Imperial de Madrid; más tarde, cursó artes en la Universidad de Alcalá y, luego, cánones y leyes en la de Salamanca. En 1614 entró como novicio en la Compañía de Jesús e hizo la profesión solemne de los cuatro votos en 1633. Entre ambas fechas, estudió griego, hebreo y teología en el colegio jesuítico de Huete y en la Universidad de Alcalá. A partir de 1625 y hasta su muerte en el mismo Madrid en 1658, ocupó la cátedra de historia natural del Colegio Imperial de Madrid. Solamente desde 1633 a 1636, explicó sagrada escritura y durante sus últimos cuatro años teología y cronología. Publicó un elevado número de obras, en su mayoría religiosas, mientras que sólo cuatro de ellas tienen relación con la ciencia.

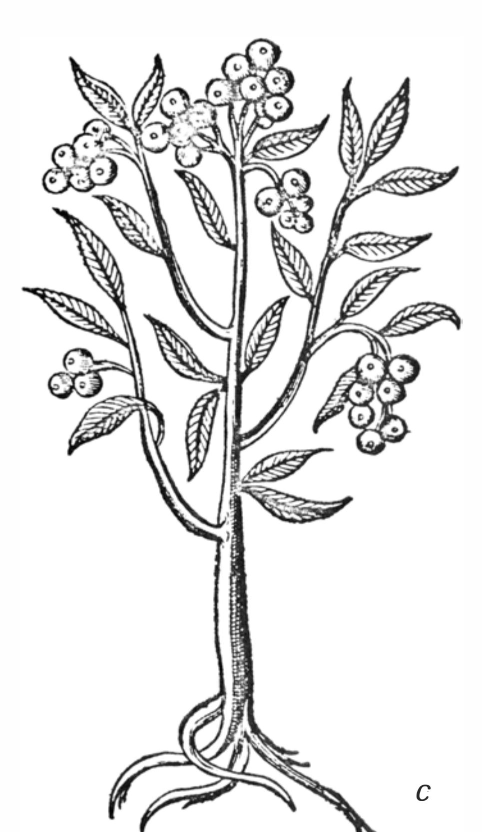
La titulada *Curiosa filosofía y tesoro de maravillas de la naturaleza examinadas en varias questiones naturales* (publicada por vez primera en 1630) y su continuación, titulada *Oculta filosofía* (1633), son ejemplos destacados de la literatura sobre curiosidades científicas de la época, caracterizada por el gusto por lo extraordinario y maravilloso. Nieremberg acumuló en ellas materiales procedentes de la magia natural, la fisiognómica, la astronomía y la astrología, uniéndolos a noticias sorprendentes y admirables del mundo mineral, vegetal, animal y humano. Ambas obras alcanzaron una gran popularidad, avalada sin duda por el prestigio de Nieremberg como autor religioso, como lo testimonian las numerosas reediciones que de ellas se hicieron. Sin embargo, a pesar de su peculiar y heterogéneo contenido, los textos de Nieremberg no carecen de interés científico. Como ha puesto de relieve Víctor Navarro, en la *Curiosa filosofía*, el jesuita dedica un "libro" a estudiar el magnetismo y otro a presentar lo que él llama "filosofía renovada de los cielos". En el primero de dichos "libros", Nieremberg trata de "la piedra Imán, como no atrae al hierro, ni mira a los Polos del mundo, ni otra estrella", siguiendo básicamente la información y las ideas expuestas por William Gilbert en *De magnete* (1600), varias de cuyas experiencias describe. Conviene con el autor inglés en que la Tierra es un imán, adoptando la nomenclatura para los polos propuesta por Gilbert: "Ni dexa de ser algún argumento los polos de la Tierra y fuerza que se extiende entre ellos la misma piedra imán, pues, entre otras condiciones, conviene con la Tierra, como muchas veces y con importunidad afirma y prueba Guillelmo Gilberto con experiencia y discurso, y el descender los graves al corazón y globo terrestre parece ser por semejante virtud que el hierro se inclina a la imán, a quien se llegan los cuerpos magnéticos como a la Tierra los graves; de modo que no parece mayor distinción entre la Tierra y la piedra sino que aquella es imán mayor, y así no debía faltarla la maravilla mayor, y es argumento alguno que la tiene ver que si unas varillas de hierro las tuvieren algún tiempo endereçadas hacia los polos, con solo el respeto de la Tierra



Tres grabados de la **Historia naturae maxime peregrinae** *(1635), de Juan Eusebio Nieremberg, que reproducen dibujos de plantas realizados en el curso de la gran expedición científica que estudió, desde 1571 a 1577, la naturaleza mexicana bajo la dirección de Francisco Hernández.* **a)** **Capolín** *o "cerezo dulce de Indias". Hernández, por una serie de detalles estructurales, estimaba "debe clasificarse entre los géneros de cerezos, aunque algunos opinan que pertenecen a las variedades del almez".* **b)** **Atatapélcatl** *o "tiesto puesto en las aguas", que Hernández había considerado "propia de las lagunas, corrientes lentas y*

granjean semejante verticidad y fuerza de volverse, como si estuvieran dispuestas y aplicadas a los polos de la imán; y apenas hay cuerpo que busque de cualquier manera la piedra (imán), que no intente con la Tierra ser igualmente oficioso". También comenta, siguiendo al mismo autor, los diversos movimientos asociados con el magnetismo, como la variación y la inclinación, aunque disiente en lo relativo al movimiento de rotación de la Tierra. Navarro ha destacado que este texto es la primera exposición conocida de las ideas de Gilbert publicada en España.

En su "filosofía renovada de los cielos", Nieremberg se muestra relativamente bien informado de algunos de los nuevos conocimientos astronómicos aportados hasta la fecha en que compuso su libro. Expone y escribe el sistema de Tycho Brahe, declarándose contrario, como era habitual entre los científicos jesuitas, al movimiento de la Tierra y a la teoría heliocéntrica. Menciona los descubrimientos de Galileo sobre las características de la superficie lunar, los satélites de Júpiter y Saturno y alude también a las fases de Venus y a las manchas solares. Niega la solidez de las "esferas" celestes, citando observaciones de trayectorias de cometas "novae" y movimientos planetarios; defiende la corruptibilidad de los cielos y que las estrellas se mueven por ímpetu propio, así como que los astros son de la misma naturaleza que la Tierra.



aguas estancadas, lo mismo que las demás especies de ninfea, a cuyas variedades también parece pertenecer, aunque las hojas son mucho más pequeñas". **c)** **Tenochtli** *o "tuna de piedra"*

La *Prolusion a la dotrina y historia natural*, que se publicó unida a la *Curiosa filosofía* a partir de la reedición de esta obra en 1634, es la lección inaugural de un curso de Nieremberg en el Colegio Imperial. Su tema principal son los animales, acerca de los cuales reúne en ventiún breves capítulos noticias muy diversas, aunque predominan las curiosidades científicas y el gusto por lo maravilloso. La obrita alcanzó celebridad en la época dentro y fuera de España, siendo elogiada por personalidades muy heterogéneas de las ciencias, las letras y la política. Entre los oyentes de la lección figuró Lope de Vega, quien le dedicó un poema que se imprimió después al frente de su texto:

"Cesó el rumor confuso,
y subiendo a la Cátedra propuso,
(corriendo la cortina
a la lengua latina
de dos rojos corales)
una licción gustosa
de plantas y animales
donde naturaleza prodigiosa
mostró mayor belleza.
Que es bella en variar naturaleza
esta pintura hermosa
que del pincel divino,
en la tabla del mundo,
miró desde su esfera luminosa,
recién nacido el Sol, cuyo camino
apenas retrataba el mar profundo...
Aunque vieron los dos del mar la arena,
hurtando al Sol los ojos con la pena
del intrépido joven Prometeo,
y dédalos del aire descansaran
donde jamás sus ciudadanos paran.
Con este igual deseo
trató la docta musa
materia tan difusa,
digna, pues aumentó la docta Oliva,
del alma del laurel vegetativa.
Pero apenas cesó, cuando dijeron
cuantos su voz oyeron
que Eusebio Nierembergo la dictaba,
o que el mismo Aristóteles hablaba".

Nieremberg publicó también una *Historia naturae maxime peregrinae* (1635), que se ocupa principalmente de la historia natural exótica con un estilo similar al de las obras anteriores. La diferencia radica en que, en este caso, el jesuita utilizó como una de sus fuentes los manuscritos y las láminas procedentes de la expedición científica a México (1571-1577) dirigida por Francisco Hernández.

La población china

El último censo confirma que suma algo más de los 1000 millones. El gobierno está aplicando enérgicas medidas para reducir la tasa de natalidad y estabilizar la cifra de población en 1200 millones

Nathan Keyfitz

Se nos recuerda muchas veces que una cuarta parte de la población mundial es china; menos, que un 80 por ciento de la población china reside en las zonas rurales del país y que, en consecuencia, el campesinado chino constituye una quinta parte de la población mundial. Las tendencias demográficas que muestre ese grupo social tan amplio no sólo interesarán, por tanto, a la China misma, sino también al resto del mundo. En muchos países en vías de desarrollo económico, la tasa de crecimiento demográfico ha disminuido más deprisa entre la población urbana instruida que entre el campesinado. La economía rural estimula el crecimiento demográfico: un gran número de hijos proporciona abundante mano de obra para trabajar la pequeña parcela de la que es propietaria o arrendataria la familia campesina. Los hijos también representan una garantía de que la tierra seguirá cultivándose cuando los padres sean mayores. Ese tipo de condiciones imperaron durante siglos en China, hasta la revolución de 1949, y la tasa de crecimiento demográfico era elevada.

La colectivización de la agricultura tras la revolución comunista eliminó buena parte del incentivo económico de una gran familia en el campo; pese a lo cual, la tasa de crecimiento demográfico se mantuvo elevada, debido a la persistencia de actitudes culturales profamiliares, al brusco descenso de la tasa de mortalidad y a la escasa atención prestada al control de la natalidad. Sólo después de la muerte de Mao Zedong, en 1976, empezó a aplicarse enérgicamente el control demográfico como política oficial. Mas la particular estructura política de la sociedad china, que facilita una rápida puesta en vigor de las decisiones políticas, ha permitido que la tasa de crecimiento demográfico disminuyera mucho más rápidamente allí que en ningún otro gran país en vías de desarrollo económico. Además, a diferencia de lo ocurrido en muchas naciones en vías de desarrollo, las reducciones de la tasa de natalidad se han producido tanto en las zonas rurales como en las urbanas.

Aunque, para un país en vías de desarrollo, una disminución del ritmo de crecimiento de su población resulta globalmente favorable, un rápido descenso de la tasa de natalidad conlleva importantes costes sociales. La actitud oficial del gobierno parte de la premisa de que la población máxima que puede mantener China es de 1200 millones de habitantes, es decir, 200 millones por encima de la cifra computada en el censo más reciente (realizado en 1982). He investigado, por proyecciones, el efecto de una caída inmediata de la tasa de natalidad hasta un nivel acorde con una estabilización de la población en los 1200 millones de personas. Las proyecciones revelan que ésta podría tener al menos dos implicaciones importantes. La primera es que, a mediados del siglo XXI, la población china presentará una estructura por edades desfavorable: un grupo relativamente reducido de trabajadores tendrá que mantener a un amplio grupo de jubilados. La segunda es que esa nación sólo podrá estabilizar su población en los 1200 millones de habitantes si los matrimonios tienen un promedio de menos de dos hijos durante la mayor parte de

UNIDAD ADMINISTRATIVA	POBLACION (MILLARES)
BEIJING	9231
TIANJIN	7764
PROVINCIA DE HEBEI	53.006
PROVINCIA DE SHANXI	25.291
REGION AUTONOMA DE MONGOLIA INTERIOR	19.274
PROVINCIA DE LIAONING	35.722
PROVINCIA DE JILIN	22.560
PROVINCIA DE HEILONGJIANG	32.666
SHANGHAI	11.860
PROVINCIA DE JIANGSU	60.521
PROVINCIA DE ZHEJIANG	38.855
PROVINCIA DE ANHUI	49.666
PROVINCIA DE FUJIAN	25.931
PROVINCIA DE JIANGXI	33.185
PROVINCIA DE SHANDONG	74.419
PROVINCIA DE HENAN	74.423
PROVINCIA DE HUBEI	47.804
PROVINCIA DE HUNAN	54.009
PROVINCIA DE GUANGDONG	59.299
REGION AUTONOMA DE GUANGXI ZHUANG	36.421
PROVINCIA DE SICHUAN	99.713
PROVINCIA DE GUIZHOU	28.553
PROVINCIA DE YUNNAN	32.554
REGION AUTONOMA DEL TIBET	1892
PROVINCIA DE SHAANXI	28.904
PROVINCIA DE GANSU	19.569
PROVINCIA DE QINGHAI	3896
REGION AUTONOMA DE NINGXIA HUI	3896
REGION AUTONOMA DE XINJIANG UYGUR	13.082

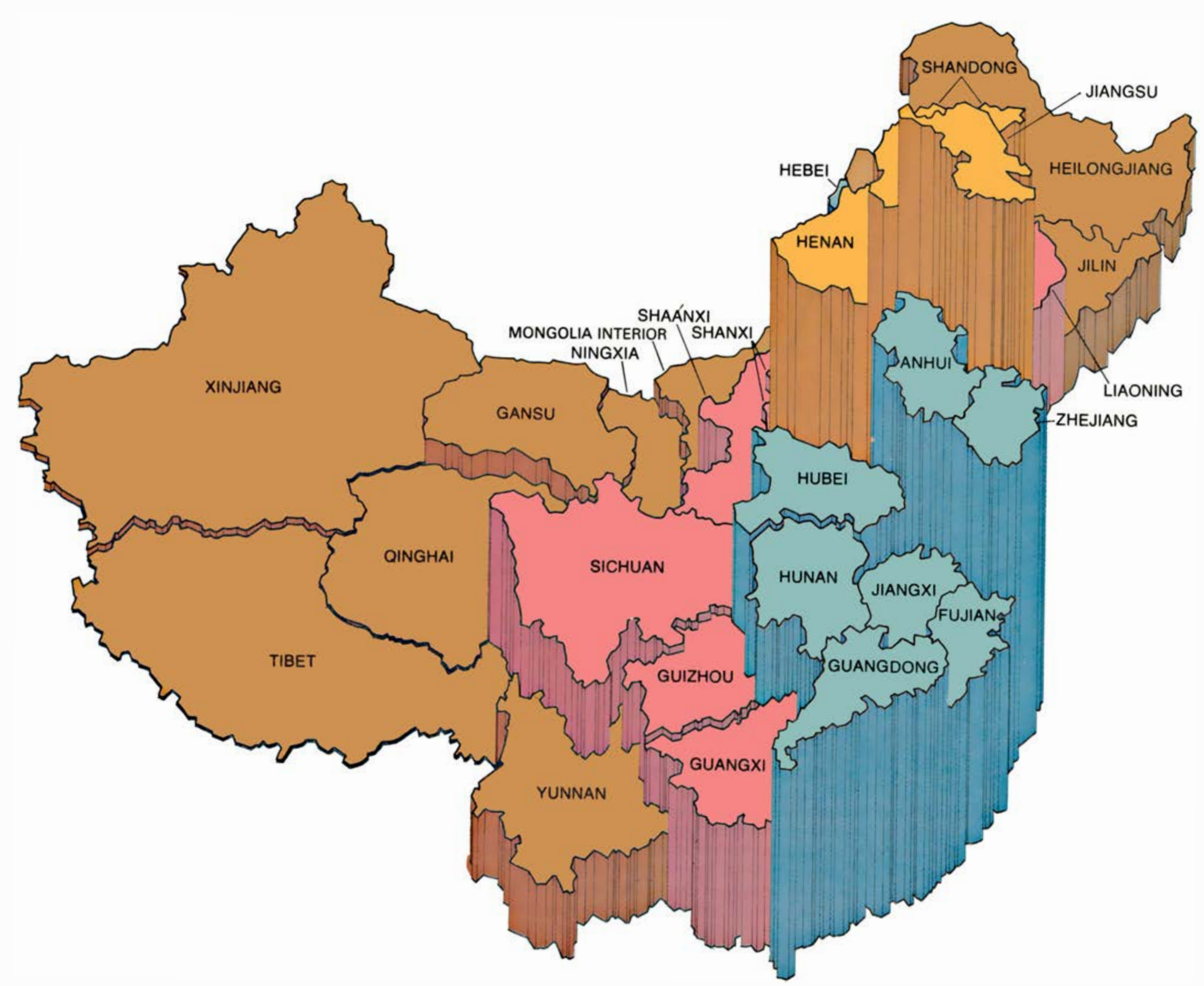
1. DENSIDAD DE POBLACION DE LAS PROVINCIAS CHINAS, representada en un mapa donde la altura de cada zona es proporcional a su densidad de población. El color amarillo indica una densidad media de más de 400 habitantes por kilómetro cuadrado, el azul una densidad de 200-399, el rosa de

la década de 1990, cifra inferior a la que se observa en la mayoría de los países económicamente desarrollados.

Las autoridades de la República Popular tienen muy presentes estas implicaciones. Las proyecciones plantean a los responsables algunas decisiones difíciles. Un descenso más rápido de la tasa de natalidad reduciría en última instancia la presión sobre los recursos naturales, pero la distribución por edades resultante sería aún más desfavorable y se requeriría una disciplina social todavía más enérgica para imponer la planificación familiar a la población. Una disminución más lenta de la tasa de natalidad exigiría una disciplina social menos rigurosa y daría lugar a una distribución por edades más favorable, pero la presión sobre los recursos naturales y sobre el capital disponible para el desarrollo económico sería considerable. Cualquiera que sea la alternativa que adopte el gobierno, es evidente que la sociedad más numerosa del mundo está llevando a cabo una de las experiencias demográficas más fascinantes de la historia humana. Sus resultados repercutirán en aquellas partes del mundo en vías de desarrollo que conozcan tasas de natalidad todavía elevadas, y en la totalidad de la población humana.

En la República Popular China se han producido muchos cambios desde la muerte de Mao, pero ninguno tan notable como el cambio de orientación de la política demográfica. Mao creía que el pueblo chino, por numeroso que fuese, lograría construir las bases materiales de la prosperidad; "La revolución sumada a la producción" resolvería todos los problemas, se decía. El régimen de Deng Xiaoping, en cambio, ve en el crecimiento demográfico el principal obstáculo para una mejora del nivel de vida. La importancia que concede el presente régimen al control de la natalidad se evidencia en muchas declaraciones y actuaciones oficiales. Por ejemplo, en diciembre de 1982, el Congreso Nacional del Pueblo aprobó una nueva constitución nacional, la cual incluye un apartado que define la planificación familiar como un deber de todo matrimonio.

Mi interés por la política demográfica china se acentuó durante una visita de un mes a ese país, realizada en enero de 1982 bajo los auspicios de un programa de intercambios académicos patrocinado por el Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de Ciencias. En el curso de la visita recorrí Beijing, Chengdu y Cantón, así como varias regiones campesinas. Di conferencias para, y me entrevisté con, personas pertenecientes a distintos estamentos de la sociedad china: obreros industriales, campesinos, administradores y funcionarios del gobierno.



100-199 y el ocre de menos de 100. La costa oriental, con sus grandes puertos y concentraciones industriales, es la parte más densamente poblada del país. La tabla de la izquierda indica la población de las provincias, las regiones autónomas y los tres municipios independientes (Shanghai, Beijing y Tianjin), según los primeros datos proporcionados por el censo elaborado en 1982. Shanghai, con 11,9 millones de habitantes, es la ciudad más populosa.

Estas experiencias permitieron hacerme una idea de cómo se vive el problema del crecimiento demográfico en la República Popular, impresiones que reforzaron la información objetiva extraída de los censos y proyecciones estadísticas.

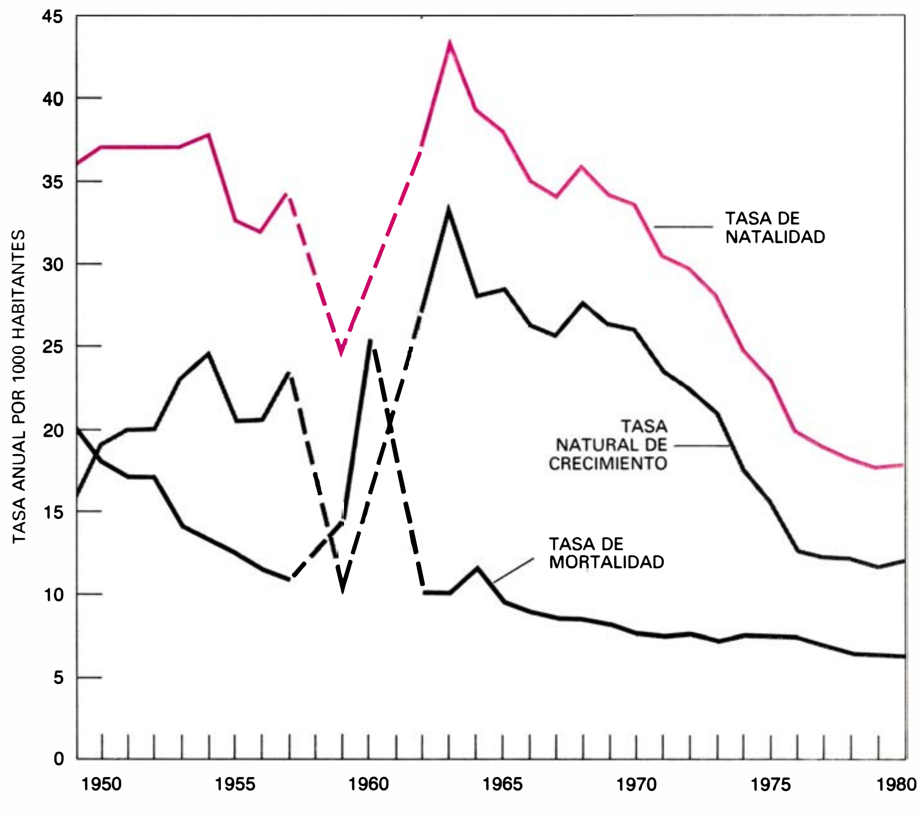
La justificación oficial más frecuente del control del crecimiento de la población china es la escasez de los recursos agrícolas. Aunque el consumo alimentario per cápita se ha incrementado desde la revolución, los funcionarios afirman que un 10 por ciento de la población está subalimentada. Además, la mayor parte del país está formado por montañas, desiertos y otros terrenos no cultivables. El 11 por ciento del territorio total en explotación abarca prácticamente hasta el último metro cuadrado de tierra cultivable. Un artículo publicado recientemente en la primera página del *Diario del Pueblo*, el periódico del Partido Comunista Chino, afirmaba que si la población continúa creciendo al mismo ritmo que en los últimos 20 años, la presión demográfica pondrá en peligro las mejoras en el nivel de vida logradas a partir de 1949.

Si bien el incremento del consumo alimentario per cápita ha sido lento, se han producido considerables cambios en la distribución de los productos agrícolas. A diferencia de muchas otras naciones en vías de desarrollo, China ha escogido una política igualitaria de distribución de alimentos. Se ha procurado ofrecer una dieta sana, aunque austera, para todos. Al mismo tiempo, el sistema de racionamiento impide que la gente dedique los aumentos de salario a adquirir alimentos, de modo que las diferencias en los ingresos no se traducen inmediatamente en diferencias alimentarias. En muchos países en vías de desarrollo se dedica hasta un 80 por ciento de la renta adicional a la adquisición de alimentos; en China esta cifra se sitúa, dicen, en un 20 por ciento. En particular, se ha frenado a un nivel bajo el consumo de carne. Mientras siga habiendo hambre entre la población se prefiere dedicar los cereales disponibles al consumo humano y no a alimentar ganado. Se favorece el gasto en productos manufacturados, lo cual estimula el desarrollo industrial. Aún así, en China existe una considerable demanda contenida de alimentos de mejor calidad. Un rápido crecimiento demográfico incrementaría esa demanda y quizá también generaría una resistencia política.

Aunque las limitaciones, bien definidas, de la agricultura son la principal motivación de la planificación familiar en China, otras consideraciones han reforzado la voluntad colectiva de limitar el crecimiento demográfico. China cuenta con un considerable potencial de expansión industrial y de su producción de energía. Pero el desarrollo económico requiere bastante capital. Los funcionarios chinos han asimilado perfectamente un argumento avanzado, hace ya más de 20 años, por Ansley J. Coale y Edgar M. Hoover, de la Universidad de Princeton. Coale y Hoover afirmaban que si un país en vías de desarrollo presenta una alta tasa de natalidad, el capital necesario para el desarrollo industrial se dedicará al sustento y educación de la generación más joven. Una tasa de crecimiento demográfico más baja facilitaría la acumulación del capital necesario para el desarrollo.

Otra desventaja derivada de una alta tasa de crecimiento demográfico es la presencia de muchos jóvenes en busca de trabajo. El problema del empleo juvenil es particularmente acusado entre dos grupos: la población urbana instruida y los residentes de las zonas rurales en las cuales la mecanización ha reducido la demanda de fuerza de trabajo. De estos dos grupos, el que plantea un mayor riesgo político es el de los instruidos. En China, los intelectuales han sido tradicionalmente personas respetadas y de sus filas han salido los dirigentes de muchos movimientos de oposición política, incluida la revolución de 1949. El gobierno necesita los conocimientos, experiencia y prestigio de la población urbana con un nivel alto de instrucción, pero duda de su fidelidad política.

El problema se ve acentuado por la escasez de puestos de trabajo idóneos para las personas instruidas. El régimen procura limitar el volumen de su burocracia, que por excesivo ya frena el rendimiento. Ante la imposibilidad de acceder a empleos oficiales, muchos jóvenes urbanos ocupan actualmente lo que se consideran empleos provisiona-

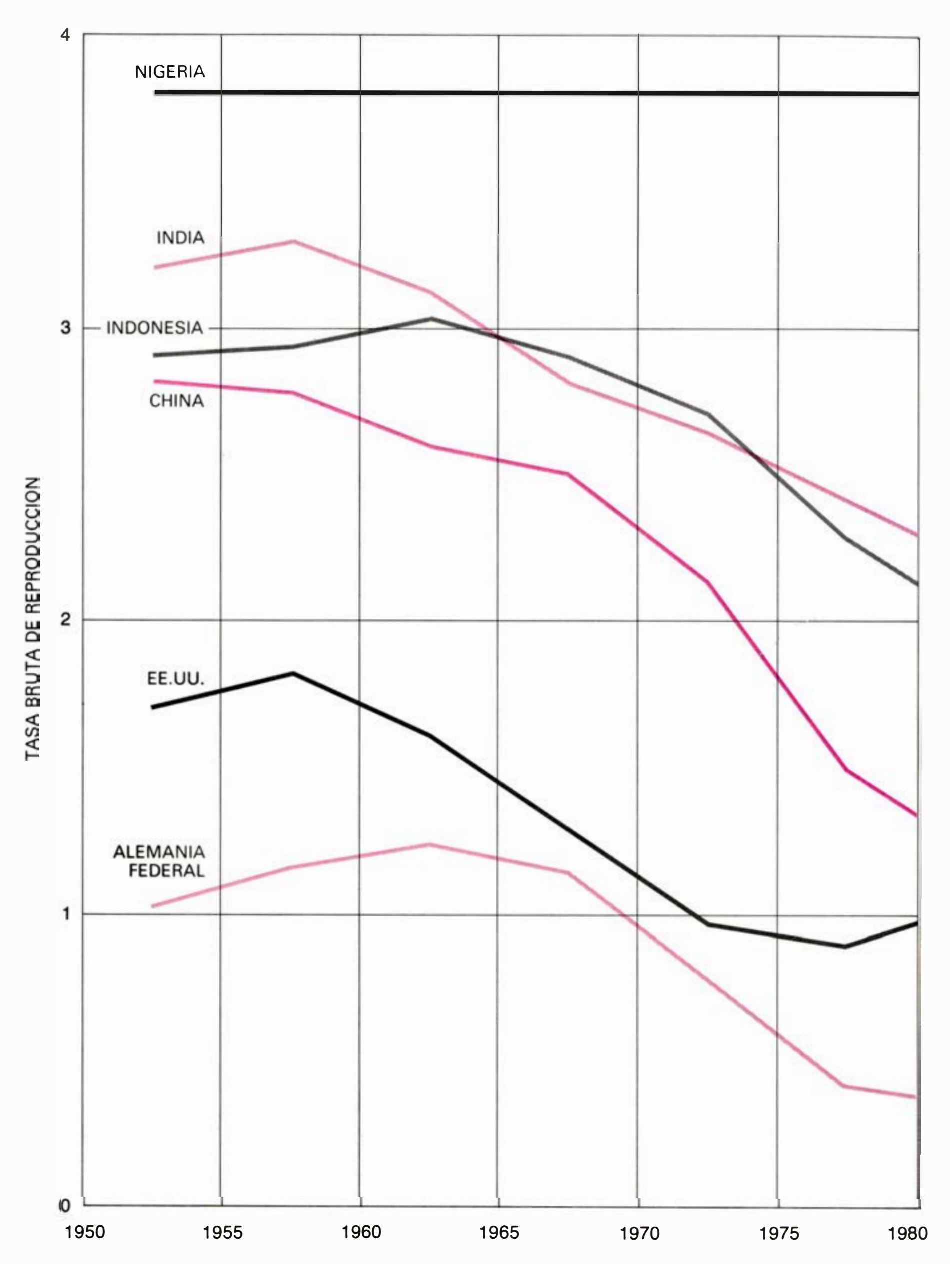


2. LOS INDICES DEMOGRAFICOS han fluctuado notablemente en China después de la revolución de 1949, impulsados por factores económicos, políticos y sanitarios. La tasa natural de crecimiento resulta de la diferencia entre las tasas de natalidad y de mortalidad. Las líneas discontinuas corresponden a los años en que los índices demográficos han tenido que estimarse. Gracias a la distribución más igualitaria de los alimentos, y a una atención médica universal, aunque rudimentaria, la tasa de mortalidad ha bajado continuamente, excepto durante un breve período de perturbación económica provocado por el "Gran Salto Adelante" de 1960. La tasa de natalidad, que era alta en la época prerrevolucionaria, disminuyó en los años 1950 y luego aumentó durante la Revolución Cultural de mediados de la década de 1960. En los años 1970 empezó la enérgica aplicación de una política oficial de control demográfico, con lo cual la tasa de natalidad descendió rápidamente. La "Campaña del Hijo Unico", lanzada en 1979, ha originado nuevos descensos. La tasa de crecimiento natural ha disminuido, pero la población sigue aumentando. Parece, no obstante, que la tasa de natalidad ha registrado un nuevo crecimiento a partir de 1980.

les: trabajos de baja categoría que aprovechan escasamente sus cualificaciones. Trabajan con la expectativa de pasar a ocupar puestos de mayor responsabilidad y prestigio en cuanto se produzcan vacantes, pero éstas no abundan.

Uno de los motivos de la escasez de puestos vacantes es que las personas de más edad ocupan posiciones inamovibles en la cúspide del escalafón laboral. Los dirigentes políticos que encabezaron la lucha contra el Kuomintang en los años 1930 son ahora septuagenarios y aún siguen aferrados a puestos de autoridad. Al final de su carrera, detentan los cargos más visibles y de mayor responsabilidad, y cierran el paso a la promoción de las dos generaciones que les siguen. El régimen ha solicitado la dimisión de algunos funcionarios de más edad, como una concesión simbólica hacia los más jóvenes cuyas oportunidades de promoción se hallan bloqueadas. Pero estos gestos contribuyen muy poco a crear oportunidades profesionales para los millones de nuevos graduados universitarios. Un crecimiento más lento de la población significaría un menor número de jóvenes urbanos subempleados en el futuro.

El exceso de población no representa una amenaza tan grave en las zonas rurales como en las ciudades, pero el campo también tiene sus problemas. Ya no se fomenta la mecanización de la agricultura con la energía de antes. Sin embargo, la introducción de maquinaria agrícola bastante simple ha incrementado el producto por trabajador en los cultivos. Dado que la extensión de terrenos aprovechables es bastante limitada, cualquier incremento en la productividad disminuye la demanda de fuerza de trabajo. La participación de la agricultura en el producto interior bruto disminuyó de un 47 por ciento, en 1952, a un 26 por ciento, en 1970. A fin de dar cabida a las personas desplazadas del trabajo agrícola, el gobierno ha estimulado la instalación de industrias ligeras en el campo, pero la búsqueda del capital necesario para estos proyectos impone una considerable presión sobre los frágiles presupuestos de los organismos públicos de pequeño nivel.



3. HA DESCENDIDO EL RITMO DE REPRODUCCION en China más rápidamente que en ningún otro gran país en vías de desarrollo. Las curvas representan la tasa bruta de reproducción de diversos países. Esta indica el número medio de hijas que tendría cada mujer si todas las mujeres sobrevivieran hasta el final de su edad fértil. En China esa tasa ha disminuido desde alrededor de 3,0, en 1950, hasta menos de 1,5, en 1980. En Indonesia, un país en vías de desarrollo con un programa de planificación familiar muy bien organizado, la tasa permanece por encima de 2,0. En los Estados Unidos y otros países económicamente desarrollados quizá sea de 1,0 o inferior. En Nigeria, donde no ha habido disminución, la tasa bruta de fertilidad es de un 4,0: las mujeres sanas tienen un promedio de ocho hijos.

Además de los problemas que plantea sobre los recursos y el empleo, un crecimiento demográfico incontrolado podría agravar las tensiones entre la ciudad y el campo. Las naciones en vías de desarrollo tienen dificultades para limitar la extensión de sus ciudades, en particular el de la ciudad más grande. En China, el aparato de control gubernamental ha frenado la afluencia de la población hacia los centros urbanos. Sólo las personas que tienen un empleo están legalmente autorizadas a residir en las ciudades y a obtener tarjetas de racionamiento, vivienda y cupones que dan derecho a adquirir atención médica y bienes de consumo, incluidas las importantísimas bicicletas. Gracias a ese control, en China no se ven las poblaciones suburbiales que rodean las ciudades de muchos países pobres. Pero ni aún esa rigurosa política oficial puede impedir que algunos chinos residan ilegalmente en las zonas urbanas en casa de sus familiares. En estos momentos, las ciudades albergan un 21 por ciento de la población, y limitar el éxodo de las comunidades agrícolas ha representado una lucha constante, que las autoridades a veces han ganado y otras no.

Si la población urbana crece a un ritmo más rápido que la producción industrial de las zonas urbanas, la población rural verá aumentada su carga. Los residentes de las ciudades se alimentan en gran parte con los aproximadamente 50 millones de toneladas

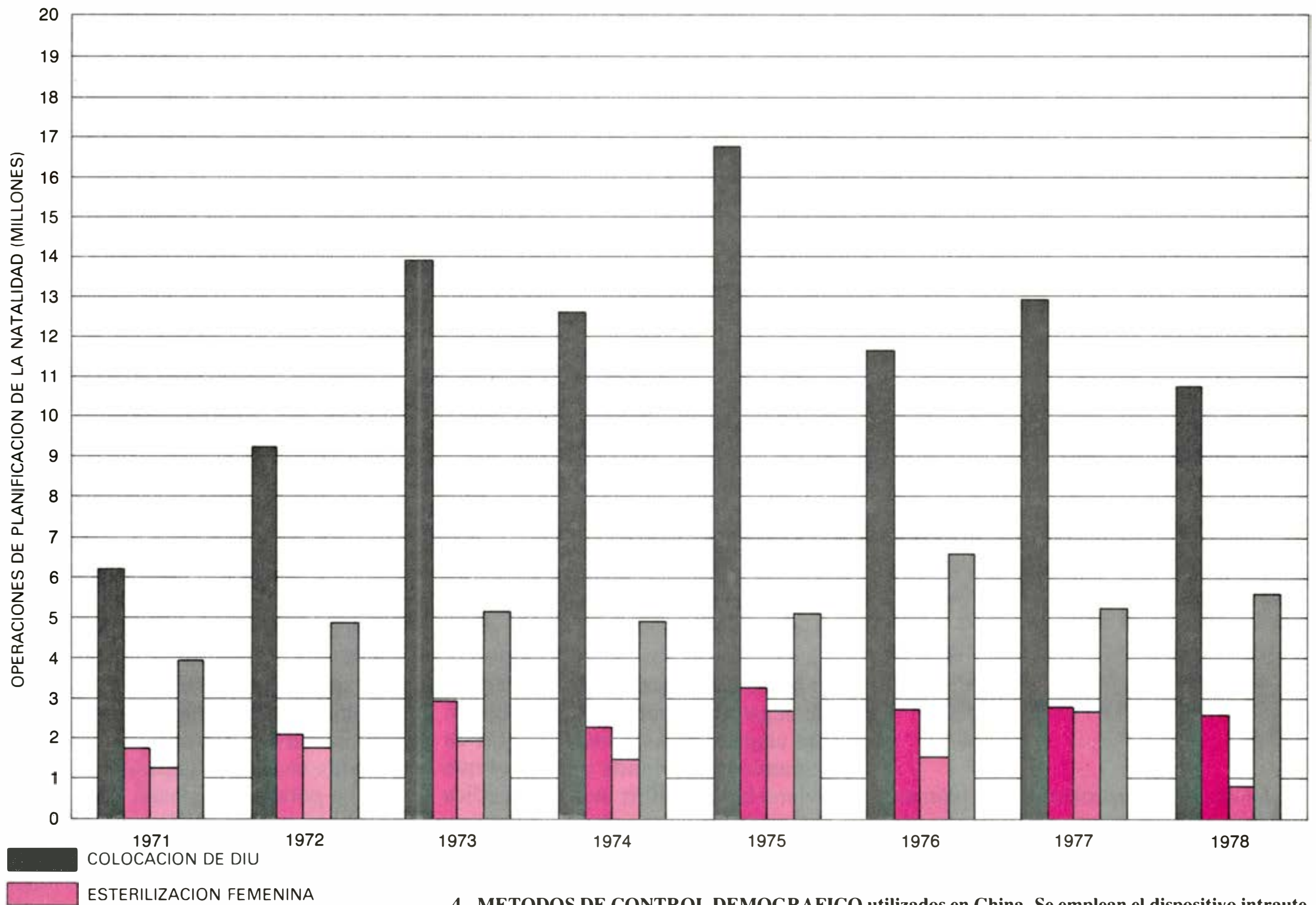
anuales de cereales designados como cereales comercializables. Estos cereales se venden a un precio controlado y sometidos al sistema de racionamiento. Los cereales se recogen en parte mediante un impuesto en especies que deben pagar los colectivos agrícolas. Aumentar la carga impositiva que pesa sobre las zonas rurales acarrearía el riesgo de reavivar el conflicto entre habitantes de las ciudades y campesinos.

Por tanto, el deseo de limitar el crecimiento demográfico, motivado por la escasez de recursos, se ve reforzado por varios factores sociales y políticos. El censo oficial realizado en julio de 1982 no mitigó en absoluto las preocupaciones oficiales. En efecto, los resultados hechos públicos encierran pocas sorpresas. La cifra total de población, con 1008 millones de habitantes, se aproximó mucho a las estimaciones previas. La alta prioridad que se concede a los temas demográficos quedó patente en el tiempo y energías dedicadas a la confección del censo. Se nombraron unos 5,7 millones de recogedores de datos y un miembro de cada familia estaba obligado a presentarse ante un funcionario del censo y responder a 19 preguntas. Unos 100.000 empleados trasladan ahora el contenido de los 300 millones de formularios a archivos de ordenador.

Sólo se han publicado cifras globales de los datos obtenidos; entre ellas las correspondientes a población de las 26 provincias y regiones autónomas. Los resultados finales, que proporcionarán información más detallada, la distribución de la población por edades, por ejemplo, están anunciados para antes de finales del presente año. Los datos publicados sobre las distintas provincias confirman las acusadas variaciones de la densidad de población en China. La región oriental, donde se ubican los grandes puertos, sigue siendo la zona más poblada del país. Shanghai, que alcanza los 11,9 millones de habitantes, es aún la ciudad más grande. La franja que va de Shanghai a Beijing continúa siendo la zona más industrializada, pese a los esfuerzos oficiales por fomentar el desarrollo industrial en la región occidental del país.

La centralización de la producción industrial conlleva grandes economías de escala, y los intentos del gobierno por dispersar la industria topan con factores económicos y sociales ocultos. El escaso éxito de la descentralización ofrece un sorprendente contraste con los brillantes resultados obtenidos por el programa de planificación familiar.

Entre 1949 y 1980 la tasa de natalidad se redujo a la mitad, una caída sin precedentes en un gran país en vías de desarrollo. Sin embargo, la disminución de la fertilidad no ha sido uniforme ni constante. La tasa de natalidad ha experimentado marcadas fluctuaciones al compás de la evolución de la organización económica y la política social. En 1949 era de 35 nacimientos anuales por cada 1000 habitantes, nivel que se había mantenido durante muchas décadas. A consecuencia de la supresión de la propiedad privada sobre las tierras de cultivo y de las primeras campañas de control de la natalidad, dicha tasa descendió a 25 por 1000 a finales de la década de 1950. Durante la



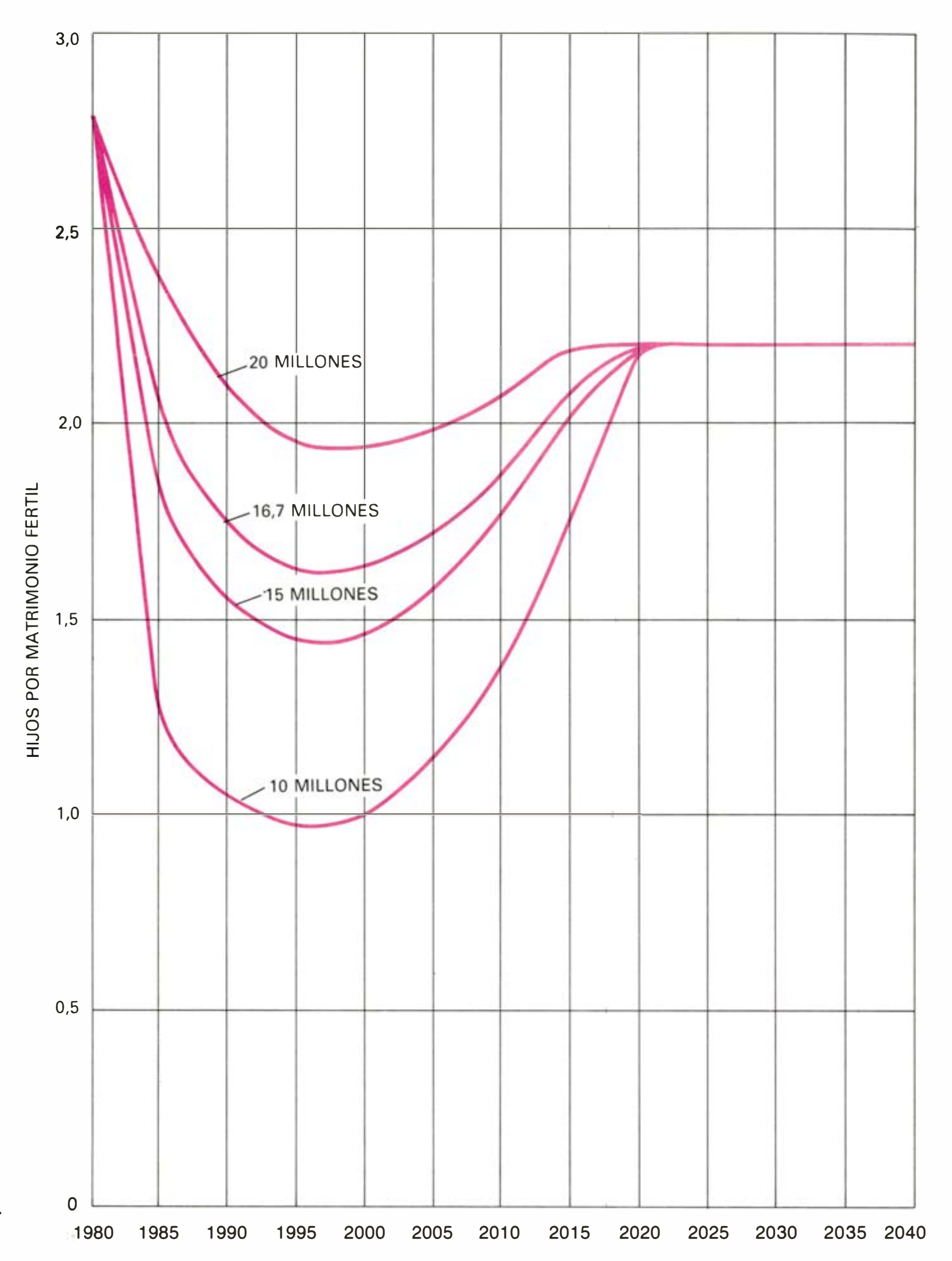
4. METODOS DE CONTROL DEMOGRAFICO utilizados en China. Se emplean el dispositivo intrauterino (DIU), la esterilización masculina y femenina y el aborto provocado. Las columnas indican el número de veces que se utilizó cada método en cada uno de los años del período 1971-1978. El gobierno ofrece gratuitamente los cuatro métodos. China ha dado prioridad al DIU frente a los demás sistemas.

Revolución Cultural y otros avatares políticos de los años sesenta la planificación de la natalidad dejó de constituir un objetivo oficial y la tasa de natalidad aumentó rápidamente hasta un máximo del 44 por 1000 anual.

En la década de 1970 empezó a manifestarse plenamente el efecto de un control demográfico organizado. La Tercera Campaña de Planificación de los Nacimientos, con el lema "Más tarde, más largo, menos", propugnaba el matrimonio a edad más tardía, un intervalo más largo entre embarazos y un menor número de hijos. En 1979 le siguió un programa todavía más enérgico: la Campaña del Hijo Unico. Al entrar en 1980, la tasa de natalidad había descendido al 18 por 1000. Las cifras oficiales quizá hallan subestimado el número de nacimientos, y recientemente se ha producido también un incremento de la fertilidad. En consecuencia, en estos momentos la tasa de natalidad podría situarse alrededor del 20 por 1000.

La magnitud de la disminución de la fertilidad alcanzada es impresionante. La Campaña del Hijo Unico parece estar arraigando, al menos en algunas zonas del país. En Shanghai, Beijing y cinco de las 26 provincias y regiones autónomas entre el 80 y el 90 por ciento de todos los nacimientos corresponden a primeros hijos.

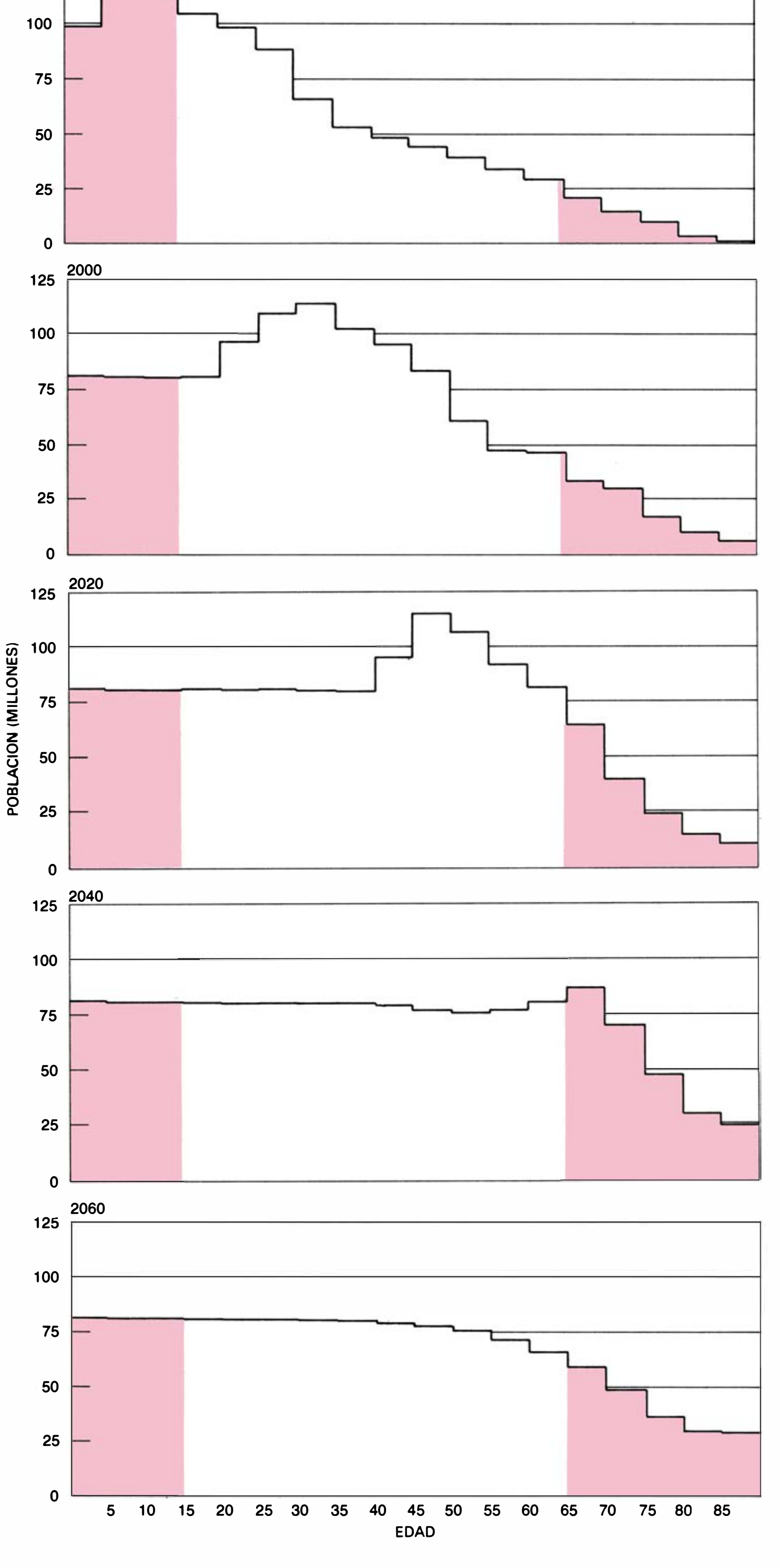
La eficacia de las recientes campañas de control de la natalidad se debe principalmente a la estructura política de la sociedad china. Esta estructura es el legado de los 20 años de lucha por el poder que libraron Mao y sus seguidores. En la lucha se seleccionaban cuidadosamente los cuadros, que se preparaban en escuelas secretas del partido; cada cuadro se convertía entonces en un eslabón de la estructura unificada de mando. Muchos de esos cuadros se reclutaban entre el campesinado, y su misión consistía en transformar a la población rural sumisa y paciente, como acostumbra a suceder entre los campesinos asiáticos, en agentes conscientes del cambio.



5. NUMERO MEDIO DE HIJOS que podría tener cada matrimonio chino si se mantuviera constante el número anual de nacimientos. La curva superior corresponde a 20 millones de nacimientos anuales, la situada inmediatamente debajo a 16,7 millones de nacimientos, la siguiente a 15 millones de nacimientos y la curva inferior a 10 millones de nacimientos anuales. En el pasado el número de nacimientos experimentó grandes fluctuaciones en China. También fluctuará, por tanto, el número de parejas que alcancen la madurez y empiecen a tener hijos en el futuro. Para que se mantenga constante el número de nacimientos, el número medio de hijos por matrimonio deberá variar a lo largo de un período de transición, con un mínimo en la década de 1990, cuando se encontrarán en su edad fértil los grandes contingentes de personas nacidas entre 1960 y 1980. Con una cifra anual de 15 millones de nacimientos, la pareja china media podría tener algo menos de 1,5 hijos durante buena parte de los años 1990. Un nivel de 10 millones de nacimientos anuales corresponde a una población final de 700 millones. Para mantener esa cifra, las parejas tendrían que tener un promedio de menos de un hijo durante buena parte de la década de 1990.

Cuando el Partido Comunista tomó el poder, la mayor conciencia y organización política desarrolladas durante la guerra se encauzaron hacia fines civiles, entre ellos la planificación familiar. En parte por haberse originado en un conflicto armado, la estructura política posee una forma jerárquica muy similar a la de una organización militar. La jerarquía se estructura en seis niveles principales. En la cúspide está el conjunto de la nación y en la base los equipos de producción, cada uno formado por entre 250 y 800 personas. Cada organismo administrativo, independientemente de su nivel, comprende una delegación del ejecutivo, una sección del Partido Comunista y una sección encargada de los servicios sanitarios. Los servicios de control de la natalidad están integrados dentro del sistema sanitario y cada organismo administrativo cuenta con personal especializado en la educación para la planificación familiar. Pequeños grupos de discusión dirigidos por cuadros del partido se encargan de transmitir el concepto de control de la población desde las más altas instancias ejecutivas hasta las parejas casadas.

Además de ofrecer argumentos en favor del control demográfico, el aparato administrativo se encarga de



distribuir material para el control de la natalidad, así como recompensas y castigos. Se ofrecen gratuitamente píldoras anticonceptivas, dispositivos intrauterinos (DIU) y operaciones de esterilización para las parejas casadas, así como exámenes físicos prematrimoniales que comprenden explicaciones sobre la anticoncepción. A diferencia de la mayoría de las demás naciones, los chinos han dado prioridad al DIU frente a los restantes métodos anticonceptivos.

Los procedimientos que se siguen para convencer a las parejas casadas de que limiten su fertilidad se dejan a la discreción de las autoridades locales, pero en todas las localidades se ofrecen recompensas por seguir la planificación familiar y se castiga a quienes tienen demasiados hijos. Se pide a las parejas de recién casados que firmen una declaración en la que se comprometen a tener un solo hijo. Hasta mediados de 1981 más de 11 millones de matrimonios habían firmado ese acuerdo, que les da derecho a recibir atención hospitalaria gratuita durante el parto, atención médica y educación gratuita para la criatura, prioridad en la concesión de una vivienda mejor y una paga mensual extra al año. Los hijos únicos, y sobre todo las hijas únicas, gozan de un trato preferente en el colegio y en la obtención de empleo.

Los castigos impuestos por los embarazos no aprobados pueden ser considerables. El nacimiento de una segunda criatura de un matrimonio que haya firmado el documento de hijo único da lugar a una amonestación oficial. El nacimiento de un tercer hijo se castiga con una reducción del salario. Muchas mujeres que quedan encinta sin permiso son inducidas a abortar. Por abortar se premia a la mujer con unas vacaciones pagadas, y lo mismo ocurre con una operación de esterilización con fines anticonceptivos. La ejecución descen-

6. PIRAMIDES DE EDADES que reflejan la evolución experimentada por la población china si el número total anual de nacimientos descendiera inmediatamente a 16,7 millones y se mantuviera constante a ese nivel. Las curvas representan la distribución de la población por edades a intervalos de 20 años, a partir de 1980. La población activa (*blanco*) tiene que mantener a la población dependiente (*color*), formada por los niños y jóvenes que no trabajan y las personas jubiladas. El efecto inmediato de una reducción de los nacimientos sería favorable: el gran grupo nacido entre 1960 y 1980 ingresaría en la fuerza de trabajo y tendría que alimentar un número reducido de jóvenes. Pero a partir de 2020, aproximadamente, aumentaría el número de jubilados, a los que deberían mantener los contingentes nacidos después de estabilizarse la natalidad en un nivel constante.

tralizada de las decisiones políticas, a cargo de celosos cuadros locales del Partido que compiten por hacer méritos, facilita la coacción, tanto en el caso del aborto como en el de la esterilización.

La combinación de anticonceptivos gratuitos y el sistema de recompensas y castigos, con un bien organizado aparato de persuasión social, han producido un resultado totalmente desacostumbrado. En la mayoría de los países en los que se ha iniciado la transición demográfica (de altas a bajas tasas de natalidad y mortalidad), la reducción de la fertilidad ha sido máxima, y la tasa de mortalidad más baja, en las zonas con el mayor nivel de urbanización y renta. Los estudios realizados por H. Yuan Tien, de la Universidad estatal de Ohio, demuestran que, hasta hace poco, existía en China una correlación entre la urbanización, la renta y la baja mortalidad, por una parte, y la disminución de la fertilidad, por otra. Sin embargo, al llegar a 1980 esta relación se hace mucho más débil y, de hecho, deja de ser significativa en términos estadísticos. Aparentemente, la campaña de planificación familiar ha llegado ya hasta las zonas rurales pobres, que carecen de los niveles sanitarios, de riqueza y urbanización asociados a la transición demográfica europea y de muchos países en vías de desarrollo.

Pese a la eficacia del programa de control de natalidad, dos factores tienden a mantener el incremento demográfico. El primero es el rápido descenso de la tasa de mortalidad. Como otros países pobres, China tuvo que escoger entre una dieta a base de carne y una avanzada atención médica para su clase media, por una parte, y una dieta universal a base de cereales y unos cuidados médicos rudimentarios y universales, por otra. A diferencia de la mayoría de países en vías de desarrollo, China optó por la alternativa igualitaria.

La elección se tradujo en un acusado descenso de la mortalidad, desde 20 muertes anuales por cada 1000 habitantes, en 1949, a 6 por cada 1000, en 1980. La tasa de mortalidad de los Estados Unidos es aproximadamente del 8 por 1000. Se trata, no obstante, de una comparación engañosa, pues la media de la población china es mucho más joven que la de la población estadounidense. Una comparación más fidedigna sería la efectuada en términos de la esperanza media de vida, que las Naciones Unidas estiman en casi 70 años en China, mientras que en Estados Unidos es de 73. Sin embargo, los progresos logrados en los últimos 30 años han sido notables: en 1950, la esperanza de vida en China era de 47 años.

El rápido descenso de la tasa de mortalidad ha provocado el aumento de la población, pese a que haya comenzado un descenso de la fertilidad. En 1949, la tasa natural de incremento demográfico, esto es, la diferencia entre el número de nacimientos y de muertes, era del 5 por 1000. Después de aumentar hasta un 20 por 1000 en los años 1960, ha descendido últimamente, pero sólo hasta el 12 por 1000. De mantenerse este índice, la población se duplicaría cada 60 años.

El segundo factor que tiende a mantener el crecimiento de la población china es la llamada inercia demográfica, el efecto retardado de una reciente historia de rápido crecimiento demográfico. Una población que acaba de experimentar un rápido crecimiento presenta una distribución por edades fuertemente sesgada en favor de los jóvenes, los cuales no tardarán en alcanzar la edad de casarse y tener hijos. Consideremos qué sucedería si todas las parejas casadas de una población de estas características redujeran de inmediato su fertilidad al nivel necesario para la sustitución biológica.

Para que una población humana pueda ir sustituyendo a sus miembros, cada pareja fértil debe tener un promedio de 2,2 hijos. La cifra ligeramente superior a 2,0 responde a la mortalidad perinatal e infantil, a la infertilidad y al número de personas que no se casan. Aunque todas las parejas casadas de la población redujeran su fertilidad al nivel de sustitución biológica, el crecimiento demográfico no se interrumpiría de inmediato, dada la gran cantidad de criaturas nacidas recientemente que se casarían y tendrían descendencia. La población continuaría aumentando durante un período de transición que duraría unos 50 años. La población estacionaria, o constante, que llegaría a establecerse finalmente podría ser hasta un 60 por ciento más numerosa que la existente en el momento de iniciarse el descenso de la fertilidad hasta el nivel de sustitución.

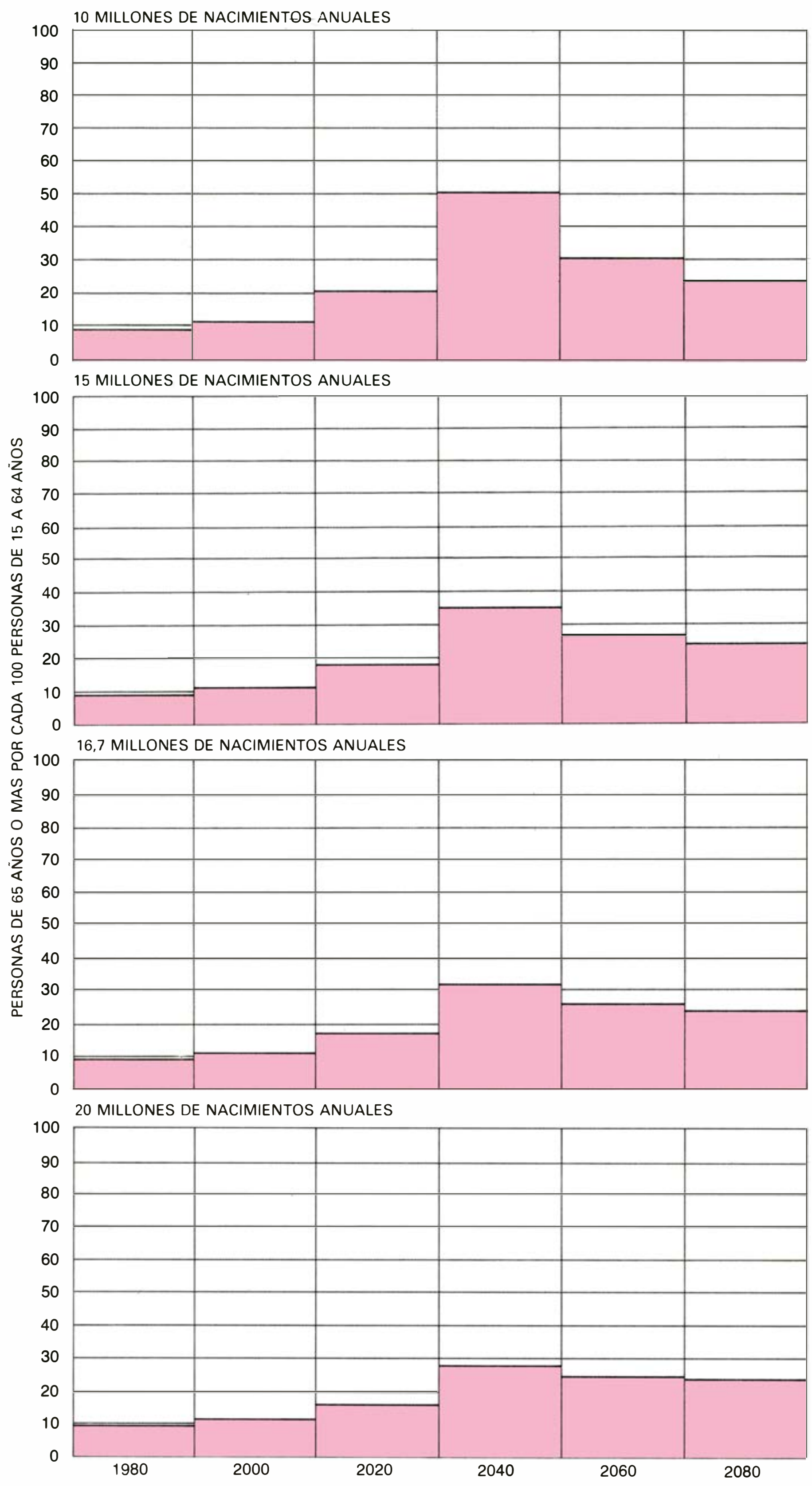
Si partimos de la base de que en China la disminución de la fertilidad hasta el nivel de sustitución se produjo en 1980, aproximadamente, y que la tasa de mortalidad seguirá descendiendo al mismo ritmo de los últimos años, en el año 2000 la población será de 1200 millones de habitantes. La inercia demográfica continuaría operando en el siglo XXI y, al llegar a 2075, la población superaría los 1500 millones de habitantes. El número de personas que pueden mantener los recursos del país es un tema muy debatido en China. Las estimaciones chinas sobre esa capacidad oscilan entre los 700 y los 1400 millones. En 1980, Hua Guofeng, secretario del Partido Comunista, declaró que el objetivo del partido era limitar la población a 1200 millones al finalizar el siglo XX. Al mismo tiempo, el gobierno se proponía que en esa fecha la población hubiera alcanzado un nivel estacionario.

Puesto que un descenso inmediato de la fertilidad hasta el nivel de sustitución daría una población final de más de 1500 millones, es evidente que para alcanzar una población estacionaria de 1200 millones la fertilidad debe ser inferior al nivel de sustitución durante el período inmediatamente anterior a la consecución de esa meta. Una forma de lograr una población estacionaria es que se mantenga constante el número anual de nacimientos. Escogiendo una cifra anual adecuada, puede lograrse una población estacionaria de la dimensión que se desee. La cifra de población fluctuará a medida que vayan envejeciendo y muriendo los grandes contingentes de personas nacidas antes de que se estabilizara el número de nacimientos, pero cuando las primeras generaciones constantes lleguen al final de su vida, la población se mantendrá estacionaria al nivel deseado.

En la mayoría de los países es una especulación ociosa preguntarse qué efectos tendría sobre la sociedad un número constante de nacimientos anuales, puesto que es imposible controlar esa cifra. Pero en China el régimen parece estar en condiciones de controlar con considerable precisión el número anual de nacimientos.

He preparado un conjunto de proyecciones de la población china durante las próximas décadas, a partir del supuesto de que el número anual de nacimientos se mantenga constante de ahora en adelante. Para ello he utilizado diferentes cifras de nacimientos, a cada una de las cuales corresponde una población final distinta.

Una meta algo más modesta que la anunciada por Hua Guofeng sería que la población sumara 1200 millones en el año 2000 y que la población constante fuera de 1200 millones, pero que se permitiera un ligero incremento de la



7. RELACION ENTRE POBLACION ACTIVA Y JUBILADOS que quedan a cargo de aquélla. Es función de la tasa de natalidad. Las columnas muestran la relación entre las personas de 65 años o más y las de edades comprendidas entre los 15 y los 64 años, para un número anual de nacimientos de 10, 15, 16,7 y 20 millones. La presente relación entre personas mayores y trabajadores es, aproximadamente, de 9 a 100. Esta relación alcanzará su nivel máximo en el 2040, cuando se hayan jubilado los grandes contingentes nacidos entre 1960 y 1980. El valor de la relación dependerá del número de personas en edad activa en 2040, esto es, del número de nacimientos anuales que se produzcan durante las próximas décadas. Con 10 millones de nacimientos anuales, la relación llegaría a ser de 50 a 100 en 2040: cada dos trabajadores tendrían que mantener un jubilado. Con 16,7 millones de nacimientos el máximo sería de 33 a 100, y, con 20 millones, se situaría aproximadamente en 27 a 100, sin alterar la edad de jubilación.

población por encima de ese nivel en el período comprendido entre el año 2000 y el establecimiento de un nivel estacionario, para luego descender a la cifra constante prevista. Este podría ser un objetivo practicable con los medios de control de la natalidad actualmente disponibles en China.

He partido del supuesto de un continuado descenso de la tasa de mortalidad y de una esperanza media de vida de 72 años para las dos próximas generaciones. Si la tasa de mortalidad sigue este curso y se establece una población estacionaria siguiendo la pauta descrita en el párrafo anterior, una población final constante de 1200 millones de personas supondría 16,7 millones de nacimientos anuales. Para simplificar, he supuesto que el descenso hasta el número constante de nacimientos se produjo en 1980.

Uno de los rasgos demográficos más importantes de una sociedad, desde la perspectiva de la asignación de recursos, es la distribución por edades de la población. Esta determina la relación entre el número de personas que trabajan y el número de personas que debe mantener la población activa. El grupo dependiente incluye tanto a los niños como a las personas mayores que se han jubilado. Un incremento de la proporción de personas muy viejas o muy jóvenes implica que debe dedicarse mayor cantidad de recursos a los dependientes y, en consecuencia, se dispone de menos capital para la inversión industrial. Estas consideraciones son particularmente importantes en un país cuyo ritmo de desarrollo económico se ve limitado por el capital disponible.

¿Cuál sería la relación entre dependientes y trabajadores en China, con 16,7 millones de nacimientos anuales? En 1985 habrían sobrevivido 81 millones de niños menores de cinco años. Pero en los 15 años anteriores a 1980 el número anual de nacimientos fue considerablemente superior a los 16,7 millones.

El gran contingente de personas nacidas entre 1965 y 1980 constituirá durante muchos años el nivel máximo de la curva que representa la distribución de la población por edades. A medida que ese gran contingente envejezca y atraviese las diversas fases de la vida activa de sus componentes, le seguirán los contingentes más reducidos nacidos después del descenso del número anual de nacimientos hasta 16,7 millones. El efecto inmediato sobre la relación entre población activa y de-



8. MAQUINARIA AGRICOLA CHINA: aunque primitiva si la comparamos con los niveles alcanzados por los países económicamente desarrollados, ha reducido la demanda de fuerza de trabajo en las explotaciones colectivas. La fotografía la tomó el autor en la provincia de Sichuan, durante una visita a China realizada en 1982. La parte delantera del vehículo que aquí vemos es una unidad dotada de un motor de gasolina, que puede tirar de un carro o de un arado con un hombre caminando detrás. En China existen pocas tierras cultivables que no estén ya en explotación, por lo que el incremento de la productividad derivado del uso de maquinaria, aunque rudimentaria, obliga al gobierno a crear industrias para emplear a los trabajadores excedentes.

pendiente sería favorable. El descenso del nivel anual de nacimientos hasta 16,7 millones representa una reducción del número de niños que compensa con creces el inicial incremento de las personas de edad. La proporción de población en edad activa, entre los 15 y los 60 años, continuará aumentando hasta 2005: los grandes contingentes recientes irán ingresando en la fuerza de trabajo, mientras se van jubilando los pequeños contingentes de los años 1920 y los pequeños contingentes de las décadas de 1980 y 1990 conforman el colectivo escolar.

Sin embargo, después de 2005 empezará a aumentar bruscamente la proporción de jubilados. Al llegar a 2040, cuando cumpla 60 años y se retire el último contingente de personas nacidas entre 1960 y 1979, la relación entre la población jubilada y la población activa habrá alcanzado su nivel máximo: habrá 32 jubilados por cada 100 trabajadores. Esta relación supondría unos costes considerables. A título comparativo, señalaremos que en 1980 había nueve jubilados por cada 100 trabajadores.

Si el número anual de nacimientos debe descender por debajo de los 16,7 millones, las oscilaciones de la distribución por edades serán aún más desfavorables. Song Jian, presidente de la Sociedad China para la Automación, ha calculado que, si se desea que cada persona reciba 85 gramos diarios de proteínas, de un 75 a un 80 por ciento de ellas de origen animal, China sólo podría mantener a 700 millones de personas.

Una población estacionaria de 700 millones corresponde a 10 millones de nacimientos al año. Si la cifra anual de nacimientos hubiera descendido a 10 millones en 1980 y se mantuviera a este nivel, al llegar a 2040 habría 50 jubilados por cada 100 trabajadores. Cada pareja de la población activa tendría que mantener a una persona mayor y la carga económica sería considerable. Con 20 millones de nacimientos anuales, cifra correspondiente a una población estacionaria de 1400 millones, las oscilaciones de la distribución por edades serían mucho menos desfavorables.

Al examinar las consecuencias de un objetivo demográfico también debe tenerse en cuenta otro tipo de coste: las tensiones sociales derivadas de la necesidad de imponer una rigurosa limitación sobre el número de hijos que se pueden tener. Como ya he señalado, cualquier población estacionaria inferior a los 1400 millones requiere que durante un tiempo las parejas casadas tengan un promedio de menos de 2,2 hijos. Si se escoge una población estacionaria muy reducida, entonces la fertilidad media debería disminuir muy por debajo del nivel de sustitución durante el período de transición.

Por ejemplo, una población final constante de algo más de 1000 millones corresponde a 15 millones de nacimientos anuales. Para mantener un nivel constante de 15 millones de nacimientos al año, la fertilidad del matrimonio medio a principios de la década de 1990 tendría que ser de menos de 1,5 hijos. Ninguna pareja podría tener más de dos vástagos; la mitad podrían tener dos hijos y la otra mitad tendría que conformarse con uno.

Si se escoge la meta extrema de 700 millones, las limitaciones que deberían imponerse a la fertilidad resultan más draconianas todavía: a principios de los años 1990 las parejas casadas no podrían tener ni un promedio de un hijo cada una. Este control tan riguroso de la descendencia, sumado al problema de la desfavorable distribución por eda-

des, indica por qué en estos momentos es imposible plantearse como objetivo una población estacionaria de 700 millones de habitantes. Con 16,7 millones de nacimientos anuales, el nivel más bajo de fertilidad se situaría alrededor de 1,7 hijos por pareja.

Los funcionarios de la República Popular ya han empezado a estudiar posibles soluciones para los problemas causados por una rápida disminución de la tasa de natalidad. Será preciso adoptar difíciles decisiones, sobre todo en el campo del empleo. Una forma de resolver el problema de un número excesivo de dependientes de edad avanzada es retrasar la edad de jubilación. Si se aumenta la edad a la cual puede retirarse una persona, disminuirá la proporción de jubilados por trabajador. De hecho, si se aumentara suficientemente dicha edad, podría seguir manteniéndose en el futuro la presente relación, pese a un aumento apreciable de la edad media de la población.

En China la edad de jubilación es actualmente de 60 años. Si cada año nacen 16,7 millones de niños, la relación entre jubilados y trabajadores existente en 1980, que como hemos visto era de 9:100, podría mantenerse aumentando la edad de jubilación a 62 años en el 2000, a 67 en 2020 y a un máximo de 73 en 2040. A partir de entonces podría empezar a reducirse lentamente dicha edad.

Un proyecto de este tipo sin duda toparía con objeciones. Algunas surgirían entre las personas de edad, que considerarían injusto tener que trabajar hasta pasados los 70 cuando sus padres se jubilaron a los 60. Pero quienes más se quejarían serían los jóvenes, que considerarían que los viejos mantenían copados los buenos empleos. Cualquiera que sea la solución escogida, es preciso mantener a los viejos; y si el número de personas de edad es elevado en relación a la fuerza de trabajo, debe escogerse entre permitirles conservar sus puestos de trabajo o jubilarlos y mantenerlos con el dinero de la hacienda pública.

Sin embargo, en estos momentos el principal problema es encontrar empleo para los jóvenes nacidos en la década de 1960, que están ingresando en gran número en la fuerza de trabajo. La alternativa adoptada consiste, en parte, en descentralizar la autoridad y confiar los temas del empleo a unidades locales, incluidas las comunas y equipos de producción. Las unidades administrativas locales deben mantener un equilibrio financiero y un equilibrio de los recursos humanos, utilizando toda la fuerza laboral disponible. En las zonas rurales, el equilibrio del empleo se ha visto amenazado por la introducción de camiones y arados mecanizados que aumentan la productividad del trabajo agrícola.

A fin de absorber el excedente de fuerza de trabajo e incrementar la producción de alimentos, el gobierno ha empezado últimamente a autorizar que algunos campesinos cultiven parcelas privadas y vendan el producto obtenido en mercados patrocinados por el Estado. Pero esta privatización tiende a reinstaurar los dispositivos sociales de la vida campesina prerrevolucionaria y, por tanto, a aumentar el valor económico de los hijos. La política de cultivos privados podría socavar los esfuerzos gubernamentales para controlar la población.

De ahí que algunas tendencias sociales recientes sugieran ciertos paralelismos con la sociedad prerrevolucionaria. La revolución de 1949, realizada en gran parte por los campesinos, fue la última de una larga serie de rebeliones agrarias. El triunfo de cada una de ellas eliminó a muchos terratenientes feudales y llevó al poder a una nueva dinastía con una corte austera e incorrupta. A medida que la nueva dinastía se iba consolidando, empezaban a aumentar los impuestos y los agricultores autónomos tenían que endeudarse para cumplir sus obligaciones con el gobierno. Tarde o temprano, los campesinos no podían seguir pagando y tenían que vender sus tierras, convirtiéndose en colonos de los grandes señores feudales, quienes podían oponerse a los recaudadores de impuestos.

Al crecer la corrupción de la corte disminuía la remuneración de los empleados públicos. El ejército, mal pagado, era ineficaz; una nueva rebelión de colonos hambrientos acababa derrocando al régimen existente. Al no modificarse el sistema de tenencia de la tierra y el sistema tributario, volvía a iniciarse un nuevo ciclo.

El crecimiento demográfico constituía un punto central del ciclo. En un comentario todavía citado en China, Han Fei-tzu escribió, hace 2500 años: "La gente piensa que cinco hijos no son demasiados y cada hijo tiene cinco hijos a su vez. En consecuencia, la población se hace más numerosa y disminuye la riqueza; la gente trabaja mucho y recibe poco". Jack Goldstone, de la Universidad del Noroeste, ha demostrado la existencia de una correlación entre el aumento de los precios de los alimentos, el crecimiento demográfico y la revolución durante la dinastía Ming. La población china casi se duplicó entre finales del siglo XIV y finales del XVI, a pesar de que la superficie cultivada aumentó en menos de un 50 por ciento. El precio del arroz se multiplicó por más de tres en el mismo período y hubo mucha agitación social. El régimen actual tiene muy presentes estos precedentes.

Con el cambio de gobierno de 1949 se abolió la forma de tenencia de la tierra que había sido el motor del ciclo prerrevolucionario. Y lo que es todavía más significativo, se transformó al campesinado chino en un grupo vigilante y políticamente activo; la transformación prosiguió con la expansión del sistema educativo tras la revolución. Este profundo cambio social explica en gran parte el éxito de la planificación familiar organizada en China. Pero la reducción del crecimiento demográfico lleva aparejados complejos problemas sociales, entre ellos una desfavorable pirámide de edades y la necesidad de imponer una fuerte disciplina social.

El régimen cuenta con un considerable apoyo entre el pueblo chino y sus directrices reciben un cierto grado de acatamiento espontáneo. Sin embargo, los diarios y otras publicaciones periódicas chinas revelan y critican muchos elementos coactivos. Una importante proporción del producto nacional, a veces hasta del 30 por ciento, se dedica a la acumulación de capital, no todo el cual se invierte adecuadamente. Parte del sacrificio que representa este 30 por ciento se destina a manter una burocracia desmesurada. La renta urbana media triplica la rural. En cuanto al éxito de la planificación familiar, John S. Aird, de la Oficina del Censo de los Estados Unidos, observa que el "factor más importante es la presión administrativa directa aplicada sobre cada familia china a través de los funcionarios de la planificación familiar y otros, que a su vez sufren presiones para que obtengan rápidos resultados". Se han publicado noticias de abortos forzados y se producen casos de infanticidio cuando el primogénito es niña. Se levantan protestas cuando una hija única y sus padres reciben privilegios excepcionales. Cabe esperar que esta y otras formas de resistencia vayan en aumento cuando la economía empiece a estar menos regimentada, bajo una política de promoción de la iniciativa privada.

El yacimiento paleontológico de Cúllar de Baza-I

Los indicios de actividad humana encontrados en el yacimiento de Cúllar de Baza-I, en la provincia de Granada, se cuentan entre los más antiguos de Europa. Los restos nos hablan de una primitiva y singular estrategia de caza

Antonio Ruiz Bustos

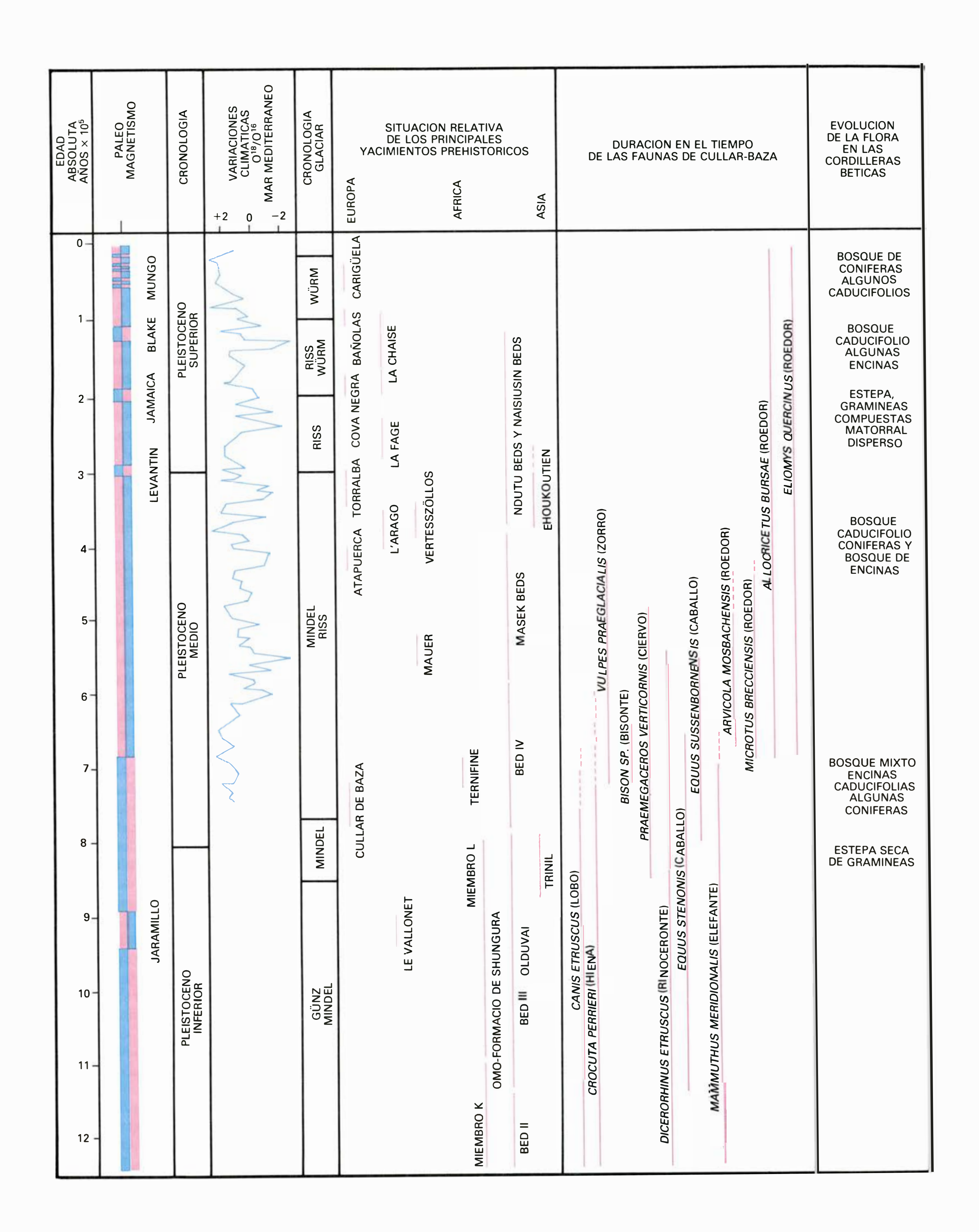
Las breves y esporádicas citas que un siglo atrás se publicaron sobre los hallazgos de mamíferos fósiles en la cuenca del Guadiana Menor, afluente del Guadalquivir, me indujeron a explorar, en el invierno de 1972, las depresiones de Guadix y Baza. Es esta una región situada en el sur de la Península Ibérica, dentro de la provincia de Granada y colindante con las de Murcia y Almería. Su paisaje entraña gran contradicción: es una llanura seca y simple si se contempla desde las alturas montañosas que rodean las depresiones, pero cobra un aspecto intrincado y laberíntico si nos sumergimos en la multitud de pequeños y pelados barrancos que las condiciones climáticas cuaternarias han formado en los materiales arcillosos que constituyen su relleno; en ellos, los restos fósiles aparecen con una gran dispersión. Si bien hoy conocemos más de una veintena de puntos donde la concentración es buena, los primeros tiempos de búsqueda fueron especialmente difíciles, ya que significaron recorrer minuciosamente un territorio donde los caminos son aún inexistentes y bajo la peculiar climatología de la zona, muy cercana a condiciones continentales extremas.

En el verano de 1973, los trabajos de exploración habían avanzado lo suficiente para permitir seleccionar un lugar con abundantes indicios óseos en superficie, que se denominó Cúllar de Baza-I, por su ubicación a cinco kilómetros al sur de la localidad de Cúllar de Baza, en la cota de los 950 metros sobre el nivel del mar. La excavación se realizó en los meses de julio a septiembre: consistió en ejecutar tres cortes, adaptados a la ladera, de seis por tres metros. El método utilizado fue cuadricular y descender por alzadas de 10 centímetros, realizar los croquis de las plantas correspondientes a cada nivel artificial en escala 1:20, para posteriormente, y una vez completado todo ello con los datos de los análisis sedimentológicos y del estudio de los perfiles laterales de cada corte excavado, reconstruir los niveles geológicos naturales y situar en ellos los restos fósiles de acuerdo con la profundidad y coordenadas en que fueron encontrados. Entre dos plantas principales, se realizaron plantas-croquis parciales, al objeto de que quedasen reflejados todos los matices de la excavación.

Cuando se iniciaron los trabajos, el yacimiento se consideraba de mero carácter paleontológico, sin que nada de lo encontrado en superficie hiciese sospechar su naturaleza prehistórica. La edad que indicaban los primeros molares de équidos recogidos era del orden de un millón de años, antigüedad supuestamente excesiva para encontrar en Europa restos de actividad humana. (Los huesos humanos más antiguos procedían del yacimiento alemán de Mauer, con una edad de 500.000 años. Los arqueólogos saben, por propia experiencia, que es hacia los 200.000 años cuando existe una razonable posibilidad de encontrar actividad humana en un yacimiento cuaternario.) Por otro lado, aunque conocíamos la existencia de industria lítica en la gruta francesa de Vallonnet, datada por su fauna con un millón de años, no era comparable en principio con un yacimiento como Cúllar de Baza-I, que se situaba en medio de una gran formación geológica de tipo lacustre, muy lejana, en principio, de reunir las facilidades que cuevas y abrigos ofrecen para albergar restos de presencia humana. Sólo cuando apareció de manera inequívoca en los niveles inferiores del corte III, aceptamos la existencia de una industria lítica en el yacimiento.

Antes, en el corte II y en los mismos niveles, habían aparecido cuatro grandes guijarros que constituyeron un auténtico enigma: eran incompatibles, desde el punto de vista sedimentológico, con el lecho donde se hallaban, a saber, una formación arcillosa de más de un metro de potencia, carente de fracción arenosa alguna. La aparición en el corte III de un *choppintool* (piedra tallada en forma de hacha), de cuarcita, provocó unos momentos de estupor; se trataba, junto con las piezas de Vallonnet, de la industria más antigua del continente, con la ventaja de que Cúllar de Baza-I al ser una formación geológica podía ofrecer mayor información y una datación más fiable. Dos son los aspectos a considerar para un acercamiento a las condiciones de vida de este hombre primitivo: los referentes al hábitat físico del yacimiento y los relacionados directamente con la actividad humana. Es necesario anteponer que las afirmaciones que se pronuncian sobre este tema poseen siempre cierto carácter hipotético.

Las depresiones, o la depresión Guadix-Baza si las consideramos asociadas, constituyen una de las cuencas intramontañosas que surgen en el sector central de las cordilleras béticas después del plegamiento alpino. Como consecuencia, el comienzo de su relleno sedimentario se inicia con materiales de edad miocena, en un medio marino somero, que comunicaría con el Mediterráneo por la cuenca del río Almanzora. Posteriormente, desde hace unos cuatro millones de años, este mar se transformó en un lago cerrado, cuyas aguas abundaron en sales hasta épocas recientes, aunque su concentración puntual dentro del mismo podía variar con la proximidad de arroyos o corrientes creadas por éstos. El yacimiento de Cúllar de Baza-I se ubica en la margen



1. CORRESPONDENCIA CRONOLOGICA del yacimiento de Cúllar de Baza con otros significativos del período cuaternario. La flora y fauna nos hablan de ecosistemas maduros. Al contrario de lo que ocurre en el área de los Alpes, en las Cordilleras Béticas son las épocas interglaciares las que tienen mayor duración. Estas, a lo largo de todo el período cuaternario, estuvieron influidas por los cambios glaciar-interglaciar y pluvial-interpluvial. Influyó asimismo la altitud de Sierra Nevada, que favorece la reproducción de todos los biotopos que las diferencias de latitud originan en el hemisferio Norte.

sureste del lago, en una época en que ha tenido ya una dilatada historia y ha atravesado períodos sucesivos de gran expansión de sus aguas y drásticas reducciones. La naturaleza arcillosa de los sedimentos que forman el yacimiento y su elevado contenido en materia orgánica indican que éste se creó durante una de las etapas de gran superficie, en que el lago se expandería hasta cubrir amplias zonas marginales creando en ellas un medio palustre, muy rico en vegetación.

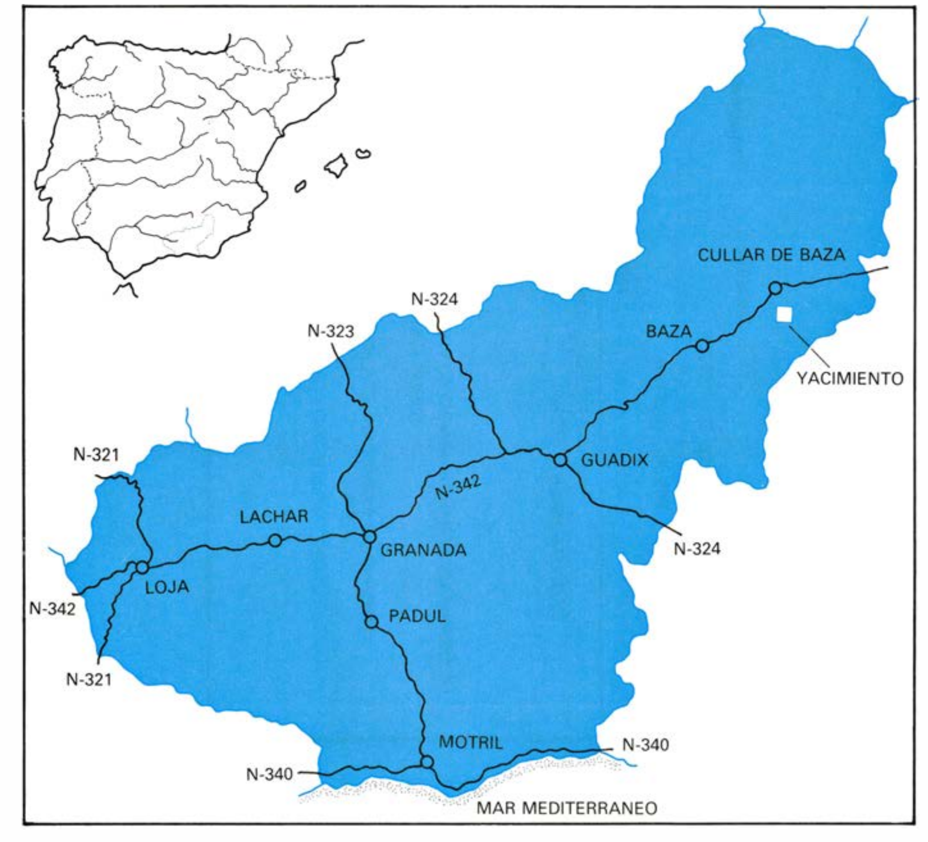
La columna geológica de la zona en el lugar del yacimiento, es decir, los sedimentos que componen la vertical geológica, consisten (de antiguos a modernos) en una sucesión alternante y continua de tramos de color rojizo, arenosos, acumulados por riachuelos y aguas salvajes en las épocas en que el lago se reduce y abandona las márgenes. Con tramos de colores blanquecinos de naturaleza arcillosa, con abundantes gasterópodos lacustres y ocasionales intercalaciones oscuras, casi negras, producidas por la acumulación local de materia orgánica: son las etapas en que el lago aumenta su superficie y se extiende cubriendo la mayor parte de la depresión. El resultado final es una alternancia repetida de colores rojizos y blancos. Dentro de esta columna estratigráfica, el yacimiento se sitúa en la extensión del lago que hace el número cuatro de las que observamos directamente en los barrancos actuales. La realización de un pequeño sondeo nos indicaría cuántas están ocultas; sospechamos que pueden ser del orden de dos a cuatro, nunca en mayor número. La que forma el yacimiento posee una potencia o espesor en el lugar de la excavación de dos metros cincuenta centímetros.

En el estudio sedimentario de los materiales excavados se han distinguido siete niveles, todos de naturaleza arcillosa; se han dividido, a su vez, en subniveles. Los criterios utilizados para la diferenciación han sido el color claro u oscuro relacionado directamente con la proporción de materia orgánica, abundancia relativa de carbonato cálcico y diferencias en la naturaleza de las arcillas que los componen. Los restos fósiles aparecen en mayor proporción, así como la industria, en la base del tercer nivel o nivel *C*; de color muy oscuro, se distingue a primera vista del resto. La arcilla dominante en este nivel es la montmorillonita, atribuida a neoformación, con desaparición total de la illita y un contenido mínimo en carbonato cálcico. El medio de depósito correspondería a un ambiente palustre restringido, en un clima suave. Los restantes niveles son variaciones de este medio producidas por la mayor profundidad del encharcamiento, la disminución de la vegetación o la precipitación de carbonatos.

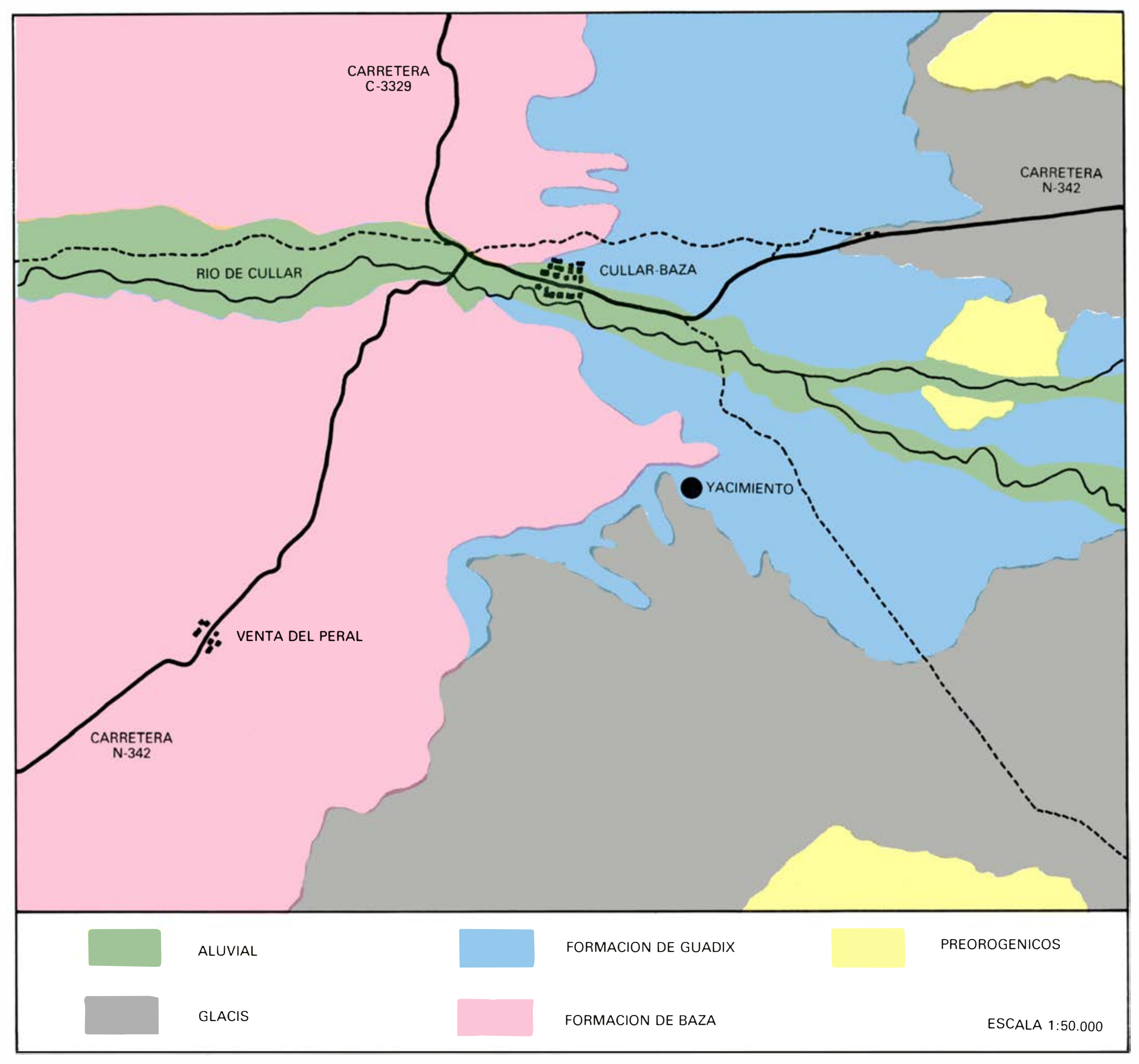
No obstante, el conjunto excavado ha de considerarse de la misma edad, pues los fósiles de roedores recogidos sistemáticamente a lo largo de su espesor muestran que son iguales en morfología y talla y que no hay diferencias evolutivas entre los procedentes de las muestras recobradas en la base y los pertenecientes a las de la parte superior; estos ejemplares, junto con el resto de los animales encontrados, dan una edad para los niveles que oscila alrededor de los 800.000 años, con un margen de error de cien mil años en más o en menos.

Los restos encontrados en el yacimiento permiten reconstruir la fauna. Abundan huesos y partes duras de caballos, rinocerontes, elefantes, ciervos, bisontes, jabalíes, hienas, lobos, zorros, liebres, cinco formas distintas de roedores, tres de pequeños insectívoros, lagartos, ofidios, tortugas, peces y moluscos lacustres. Esto implica un ecosistema muy diversificado y maduro, con un número de especies muy superior al de las conservadas en estado fósil. En términos cuantitativos, el número de piezas óseas para cada especie no es elevado, pero sí suficiente para una fiable determinación taxonómica. Los animales mejor representados en número son équidos y cérvidos.

El estudio taxonómico revela la existencia de dos tipos de équidos; uno de gran tamaño y poderosa musculatura, *Equus aff. sussenbornensis*, y otro pequeño, no mayor que un asno, y de gran gracilidad en los elementos óseos, *Equus stenonis aff. senezensis*. El rinoceronte, de la especie *Dicerorhinus etruscus*, alcanza una talla moderada; su aspecto sería próximo al del actual rinoceronte de Java. El elefante *Mammuthus meridionalis* no presenta en la actualidad ningún descendiente del género, pero podría emparentarse con el que hoy vive en Asia. Los cérvidos son de dos formas: con cuerna que recuerda la del ciervo europeo actual, aunque con un tamaño tres veces superior, y otro con cuerna en forma de pala, como la del gamo, si bien ambos se hallan muy alejados desde el punto de vista filogenético. El bisonte se aproxima al representante europeo del mismo género, pero de talla más reducida. El



2. UBICACION DEL YACIMIENTO de Cúllar de Baza en la cuenca del Guadiana Menor, afluente del Guadalquivir. El paisaje entraña una gran contradicción: es una llanura seca y monótona si se contempla desde las alturas montañosas que rodean las depresiones, pero cobra aspecto de intrincado laberinto si nos sumergimos en la multitud de pequeños barrancos que el clima formó en los materiales arcilllosos.



3. MAPA GEOLOGICO del yacimiento donde se recogen los distintos componentes. Por material aluvial se entiende el actual depositado por los ríos; glacis designa una superficie plana, erosionada durante el cuaternario. Las depresiones constituyen una de las cuencas intramontañosas que surgen en el sector central de las cordilleras béticas, después del plegamiento alpino (preorogénico). El comienzo de su relleno sedimentario se inicia con materiales del Mioceno, en su medio marino somero, que comunicaría con el Mediterráneo. Hace unos cuatro millones de años, el mar se transformó en lago cerrado.

jabalí, determinado por *Sus süssenbornensis*, no diferiría mucho del actual. El lobo, clasificado como *Canis etruscus*, es más modesto en talla y dentición que los vivos; en los zorros encontramos dos especies, *Vulpes sp.*, semejante al zorro común, y *Vulpes praeglacialis*, antecesor de nuestro zorro blanco. La hiena está emparentada con la hiena manchada actual.

Entre los mamíferos pequeños encontramos la liebre, asombrosamente semejante a la forma *Lepus granatensis* que hoy habita en la zona. Los roedores están representados por los ejemplares siguientes: un lirón, *Eliomys cf. quercinus*; un pequeño hamster, *Allocricetus bursae balaruciensis*, la más antigua de las subespecies europeas del género; el *Microtus brecciensis mediterraneus*, un topillo semejante al encontrado en el yacimiento francés de Saint-Estève-Janson y cuyo descendiente vivo es el *Microtus cabrerae*; el ratón *Arvicola mosbachensis*, que, junto al encontrado en el yacimiento francés citado, se considera la población base que sufre la diferenciación cladogenética para dar las especies actuales, y el ratón de campo *Apodemus aff. sylvaticus*. Los insectívoros pertenecen a los géneros *Neomys, Sorex* y *Crocidura*, el primero implica ecológicamente márgenes acuáticas y corrientes de agua lentas. Los lacértidos semejan, en talla, el lagarto común. El quelonio guarda un parecido mayor con las formas terrestres que con las lacustres. Finalmente, las dos vértebras de pez encontradas diríase que pertenecen a un pequeño ciprínido.

Las especies enunciadas constituyen la clave para calcular la edad del yacimiento de Cúllar de Baza-I. La sucesión de faunas durante el cuaternario europeo se encuentra ya bien establecida en su conjunto, y basta conocer las especies que libra un determinado

lugar para que, con la ayuda de las técnicas usuales en paleontología, podamos determinar su edad, teniendo en cuenta que son las especies más modernas de todas las encontradas las que condicionan la datación. La determinación de las especies de Cúllar de Baza-I han sido objeto, desde 1975, de numerosos trabajos por parte del autor; de acuerdo con los mismos podemos decir que el yacimiento se sitúa hacia el comienzo del Cuaternario medio, con una edad absoluta que oscila entre los 900.000 y los 700.000 años.

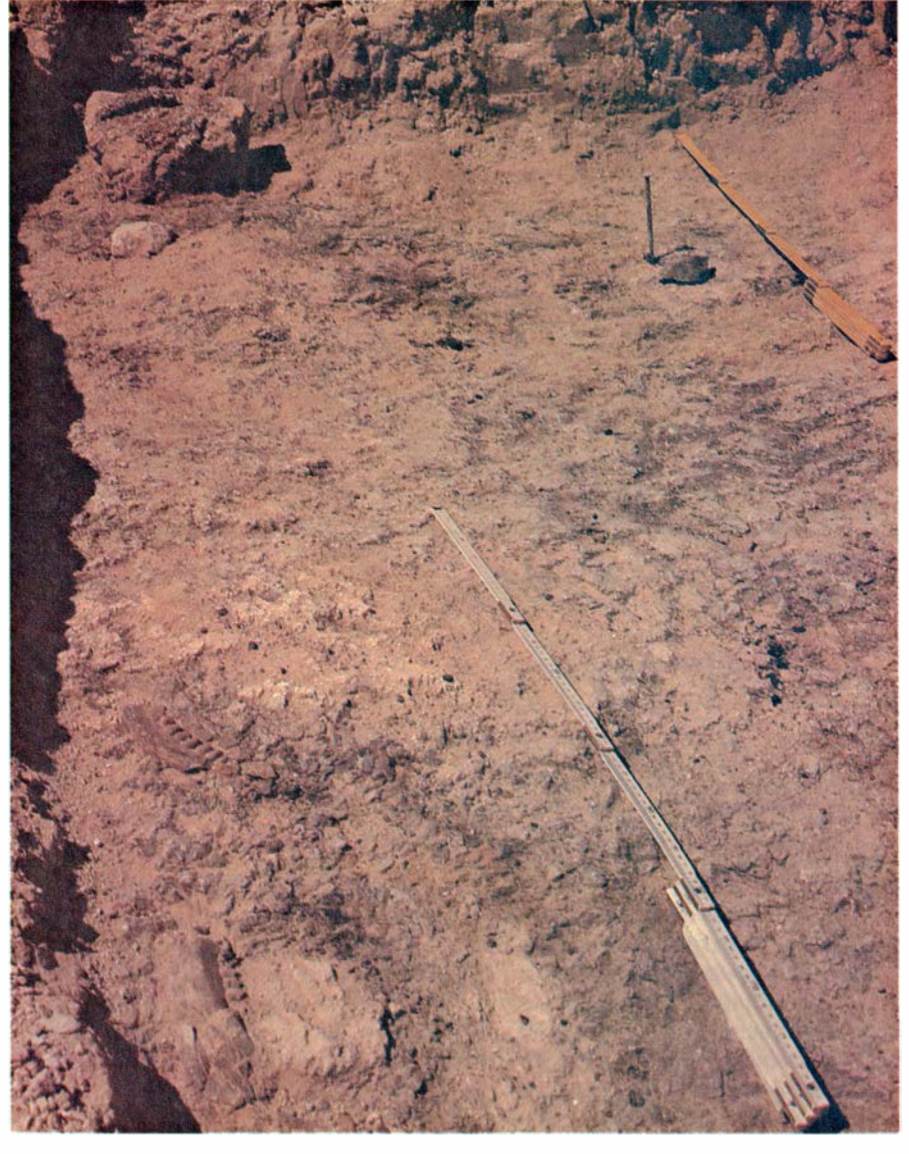
El análisis pormenorizado de las condiciones ecológicas peculiares de esta fauna permite deducir que el clima sería templado, próximo al actual de la región, aunque más húmedo. Un reducido número de especies parecen indicar que comenzaba a aproximarse o había finalizado recientemente un período más frío. A su vez, las necesidades ambientales de la fauna implican un medio mixto de espacios libres, tipo pradera y bosques con predominio de los últimos.

Vista la macrofauna del lugar, ¿qué decir de la flora? En los estudios sobre la vegetación fósil del yacimiento, los análisis polínicos realizados en 1974 hubieron de enfrentarse a la escasez de granos de polen hallados. No obstante, se pudo identificar la presencia de coníferas, posiblemente *Pinus* y *Quercus*. Con objeto de superar en parte esta dificultad, dimos un giro a nuestra investigación. Orientamos el estudio hacia la vegetación actual de la región y, a partir de ella, intentamos una aproximación a las condiciones del yacimiento. En dicho estudio relacionamos dos conceptos complementarios: vegetación real, aquella que ocupa hoy la región, y vegetación potencial, que sería la extensión que ocuparía la vegetación real de acuerdo con las condiciones naturales de clima y suelo sin la intervención agrícola humana.

La depresión ofrece un rasgo insólito, su progresiva altitud que va desde los 800 metros sobre el nivel del mar en el centro, los 950 del yacimiento, para terminar hacia los 3400 metros en las cumbres de Sierra Nevada, todo ello tan sólo en una distancia horizontal de 150 kilómetros. Este relieve condiciona una vegetación potencial que, en las máximas alturas, está formada por un desierto frío de alta montaña, que conserva hoy especies vegetales como la *Papaver suaveolens*, idéntica a la que encontrara Rasmussen en el valle de las amapolas, en el extremo norte de Groenlandia a más de 82 grados de latitud, *Cystopteris fragilis*, helecho que se puede recolectar hoy en Islandia, así como el *Ranunculus glacialis* y *Vaccinum uliginosum*, que indican que durante los períodos glaciares debió existir algo muy próximo a una tundra ártica.

A continuación, y descendiendo en altitud, descansa el piso de coníferas de montaña, que puede descender hasta los 2000 metros sobre el nivel del mar. En él destacamos el *Pinus sylvestris*, acompañado por un sotobosque de *Juniperus conmunis ssp. alpina* y *Juniperus sabina*. Dicho piso, actualmente muy degradado, en la mayor parte de los lugares alberga sólo las especies de sotobosque. Descendiendo hasta los 1500 metros sobre el nivel del mar tenemos varias asociaciones vegetales, que constituyen el piso *montano granatensis*, que viene a ser un bosque caducifolio donde medra el roble (*Quercus pyrenaica*), el arce (*Acer granatensis*) y el sauce (*Salix caprea*).

Nos encontramos luego, a menor altitud, con un bosque esclerófilo mediterráneo formado por encinas, *Quercus ilex rotundifolia*. Este tipo de bosque debería ocupar en la actualidad todo lo que se cultiva como estepa cerealista, y basta que se abandone algún lugar sin cultivo para que surja espontáneamente. En las cotas inferiores a los 800 me-



4. ASPECTO GENERAL de la planta del corte III, donde aparecieron las piezas líticas Ba-123/38 y Ba-122/89. El método empleado en la excavación fue el siguiente: cuadricular y descender por alzadas de 10 centímetros, realizar los croquis de las plantas correspondientes a cada nivel artificial en escala 1:20 y reconstruir los niveles geológicos naturales situando en ellos los restos fósiles de acuerdo con la profundidad y las coordenadas en que se encontraron. Junto a las piezas líticas aparecen aquí dos mandíbulas de ciervo, intactas, ya que carecen de médula. Del cráneo sólo se conserva la pieza formada por la base del paladar con los dientes, faltando toda la bóveda, la parte más fácil de levantar cuando lo que se pretende obtener es el cerebro. También se aprecia con nitidez la naturaleza arcillosa de los sedimentos.



5. HUESOS DE EQUIDO. Se trata del metacarpiano III, fragmentado, y de la primera y segunda falanges enteras. Dan fe de la partición de los huesos para sacar la médula: las falanges, que no poseen médula, están enteras, en tanto que el metacarpiano está roto por la diáfasis, donde hay médula; a mayor abundamiento en el mismo sentido, la epífisis distal, formada por tejido óseo esponjoso, sin médula, permanece intacta; asimismo, la fractura de la diáfasis manifiesta que se realizó de arriba abajo, es decir, del extremo proximal al distal, procedimiento que pone mejor al descubierto la médula. La posición en que se encuentran las piezas indican que tendones y ligamentos las unían cuando se partió la diáfasis.

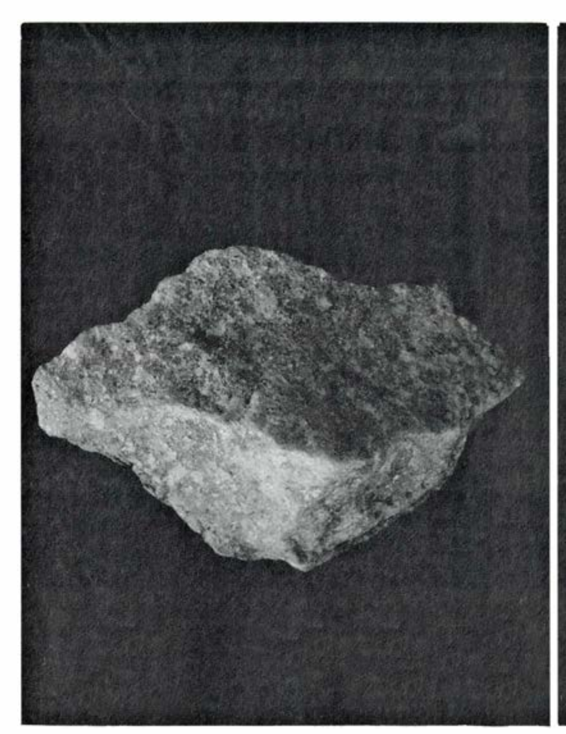
tros sobre el nivel del mar, y alejándonos hacia el oeste, encontramos un olivo silvestre (*Olea europea*) y el algarrobo (*Ceratonia silicua*). Esta distribución potencial viene en parte heredada de la última época fría, inmediatamente anterior a la actual, la cual corresponde a la última glaciación. El tránsito de las asociaciones florísticas con afinidades terciarias a una flora cuaternaria ocurre medio millón de años, como mínimo, antes de que se forme el yacimiento. Las condiciones fitosociológicas que hoy se dan en la región prolongan la situación existente hace 150.000 años. Resulta, pues, razonable pensar que el tiempo transcurrido desde la formación del yacimiento no es un período suficiente, de acuerdo con la velocidad de los cambios vegetales, para una alteración tan profunda y general que implique la desaparición de los pisos de vegetación; lo que se corrobora, además, con la presencia en los sedimentos del yacimiento de los géneros *Pinus* y *Quercus*.

En nuestra opinión, se ha desarrollado el proceso siguiente: en las épocas de glaciación, el desierto frío de alta montaña descendería a cotas tanto más bajas cuanto más intenso fuese el frío; a su vez, el resto de los pisos sufriría un corrimiento, como si fuesen empujados, hacia altitudes más bajas y menos frías. En las épocas cálidas, sería el bosque esclerófilo el que ascendería; las nieves de las máximas altitudes serían un fenómeno meramente estacional. Ello implicaría, junto a cambios en la extensión territorial de los pisos, sustituciones de especies, aparición temporal de otras o permanencia de las más resistentes, pero nunca un cambio radical en la organización de los pisos. Habrá que esperar, sin embargo, para una plena confirmación de este esquema que estudios polínicos exhaustivos de la región digan la última palabra.

Lo hasta ahora comentado nos permite suponer que, durante la formación del yacimiento, el interior de la depresión estaría ocupado por una gran laguna, cuyas márgenes tendrían un aspecto pantanoso, ricas en vegetación, con numerosas charcas someras, que temporalmente comunicarían entre sí y con la laguna central. Desde ellas hasta las cumbres de Sierra Nevada, y en virtud de las diferencias de altitud, se escalonaría una sucesión de pisos vegetales; por coincidir con una época de clima templado y húmedo, dominaría el bosque esclerófilo (encinar) y el caducifolio, quedando reducidos a las máximas alturas las coníferas de montaña y las nieves. Paisaje que se equilibraría con frecuentes espacios libres y pequeños cursos de agua que descenderían hasta la laguna. En conjunto, sería un variado mosaico vegetal, capaz de alimentar grandes cantidades de fauna.

¿Merodeó por allí el hombre? Los datos pertenecientes a la actividad humana están representados por siete elementos líticos. El catalogado Ba-123/38 es un *choppintool evolucionado*, guijarro tallado en cuarcita con forma de hacha y en el que se aprecian claros retoques de percutor duro. Lo recuperé en el corte III, en la base del nivel *C*. El clasificado Ba-122/89 aparece a un metro de distancia sobre la misma planta; se trata de un canto (*chopper*) de 11 centímetros, tallado sin la menor duda, a pesar de esta realizado en dolomía, es decir, ha recibido dos golpes en una sola de sus caras, para producirle un borde cortante y agudo. Los cinco restantes se localizan en el corte II y en la base del nivel *D* inmediato superior del *C*; de ellos, el Ba-74 estaba en el interior del perfil, que dejaba a la vista sólo una pequeña parte, razón por la que se extrajo al terminar los trabajos. Los cuatro restantes Ba-82, Ba-83, Ba-84 y Ba-85 aparecieron en planta. El Ba-85 mide 8 centímetros de longitud; puede considerarse un canto (*chopper*), aunque no se ajusta tanto a la consideración de tal como el Ba-122/89. Los cuatro restantes son grandes guijarros de entre 15 y 17 centímetros de diámetro. Con tendencia a ser intermedios entre elipsoidales y esféricos. Su peso oscila de 1200 gramos a 1400 gramos. La superficie ofrece un rodamiento natural, semejante al de los cantos fluviales; curiosamente, hay en todos ellos una zona en la que se observa una superficie de fracturación, que pudo realizarse de manera fortuita y natural o ser artificial y provocada. Desgraciadamente, su naturaleza dolomítica un poco metamorfizada, común en las rocas de la región, hace difícil reconocer las técnicas de talla. Lo único objetivo que se puede afirmar de estos guijarros es su transporte por el hombre desde el lugar donde son abundantes, el lecho de un arroyo, hasta una formación arcillosa (en el estricto sentido sedimentológico) de aguas estancadas, donde geológicamente son incompatibles, al ser únicos y no estar acompañados por ningún otro tipo de fracción detrítica diferente de la arcillosa.

La industria ósea consta de dos piezas. Se recuperó durante los trabajos de laboratorio al examinar los materiales óseos, recogidos hasta en sus menores fragmentos gracias a un cuidadoso método de excavación. El fragmento Ba-9 pertenece al corte I y el Ba-79 al corte II; ambos se hallan situados hacia la base del nivel *D*, inmediato superior al *C*. El Ba-9 mide ocho centímetros de largo por 1,4 centímetros de anchura máxima; consta de tres caras: una, la natural de la diáfisis del hueso, y las otras dos, iguales y biseladas en




6. INDUSTRIA LITICA, prueba fehaciente de que el hombre merodeó por el yacimiento de Cúllar de Baza. Siete elementos líticos constituyen las muestras recogidas hasta ahora: un *choppintool* evolucionado (un guijarro tallado en cuarcita con forma de hacha); dos cantos (*chopper*) y cuatro grandes guijarros. Lo único objetivo que se puede afirmar de estos guijarros es su transporte por el hombre desde el lugar donde son abundantes, el lecho de un arroyo seguramente, hasta la formación arcillosa en que se encontraron.

una arista dorsal, lo que origina su forma triédrica, de gran agudeza, semejante a un punzón; mas no evidencia signos de intencionalidad y no sería prueba de no haberse encontrado el Ba-79, que posee forma triangular (isósceles) de cinco centímetros de altura por dos y medio de base, cuyo vértice superior ha sido retocado consciente e intencionadamente, de forma muy hábil, para hacerlo más agudo.

Otros datos constatados y documentados durante los trabajos de campo y gabinete muestran la ausencia de huesos quemados o de restos producidos por la utilización del fuego. Para asegurarse de la falta de un ordenamiento o amontonamiento intencionado de los restos óseos, además del estudio de la ubicación de las piezas por plantas, niveles geológicos y en el conjunto de los materiales excavados, se ha aplicado un tratamiento estadístico, en el cual se hace coincidir en cada uno de los cortes excavados la longitud del mismo con el eje de abscisas, y, y la anchura, con el eje de ordenadas, x; a partir de ello, cada objeto se transforma en un punto con dos coordenadas (x,y). El conjunto de los restos óseos obtenido en la excavación, así como cualquiera de los subconjuntos que forme el investigador (tibias de los cérvidos, molares de équido, etcétera, siempre un determinado elemento anatómico, para una especie concreta y en un determinado nivel), se transforma en una nube de puntos sobre la que es posible deducir, mediante cálculo matemático, si estos puntos tienen una orientación preferente o si por el contrario todas las direcciones del plano son equivalentes, lo que manifestaría una distribución al azar. Todos los conjuntos analizados del yacimiento de Cúllar de Baza-I han dado entre sus puntos índices de correlación muy bajos, lo que apoya la hipótesis de una distribución al azar.

Es frecuente que el paleontólogo, después de haber realizado la representación cartesiana de dos parámetros, medidos sobre una serie de una misma pieza anatómica (los primeros molares inferiores de oso encontrados en un yacimiento, en los que se toma nota de su longitud y anchura máximas), pida al matemático que, sobre la nube de puntos resultante en la representación cartesiana, calcule el espacio de la gráfica, donde una nueva pieza que se añadiese a la serie de las ya medidas tendría una probabilidad del 80 por ciento de hallarse incluida; esta área variará sus dimensiones en función de la seguridad que queramos obtener: cuanto menor sea la probabilidad exigida para que se encuentre dentro, menores serán las dimensiones del área y viceversa; otros factores de los que depende la amplitud del área serán el número de puntos que constituyen la nube, así como la agrupación o dispersión que los puntos representados poseen. Trasladé este tipo de cálculo a las nubes de puntos obtenidas a partir de las plantas de la excavación, para cada pieza anatómica, de cada especie, en el mismo nivel y en cada corte. Quería averiguar cuáles serían las dimensiones del área o espacio teórico donde una nueva pieza ósea de un determinado tipo anatómico que apareciera tendría una probabilidad del 90 por ciento de encontrarse en ella. Si el hombre amontonó de intento elementos óseos en ciertos lugares, las áreas de probabilidad calculadas por el matemático aparecerán localizadas y con dimensiones reducidas; por el contrario, si las áreas son desmesuradamente grandes, la distribución ha de considerarse debida al azar. Los resultados confirmaron una inequívoca distribución al azar; la menor de las áreas resultantes, tomada como unidad, era del orden de 35 veces superior al área formada por los tres cortes excavados, es decir, de 1920 metros cuadrados y, la mayor, 116 veces superior que la supuesta unidad; corresponden, respectivamente, a las tibias de cérvidos y a los dientes de zorro. Porque el número de restos no es lo abundante que sería necesario, los resultados obtenidos poseen sólo un valor orientativo. (Los cálculos se realizaron con un ordenador UNIVAC-1108, en un lenguaje fuente FORTRAN-V.)

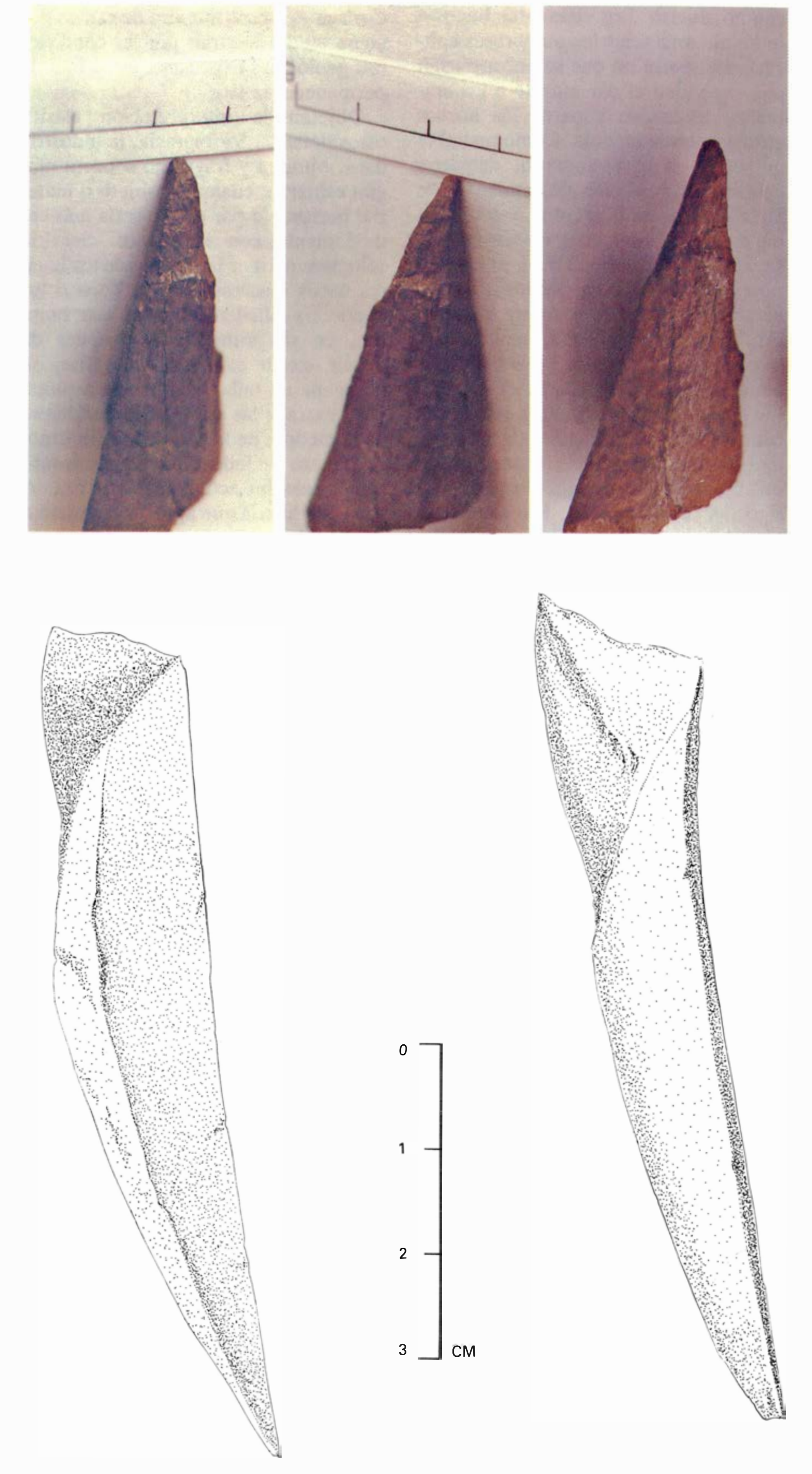
Abordé, asimismo, la proporción relativa entre las piezas óseas, con especial atención a las que, por su conexión con regiones musculosas, hubiesen podido sufrir algún transporte o destrucción: no encontré ni tamaños anormales ni que faltaran piezas. Los huesos largos están, en el 87,3 por ciento de los casos, representados por alguna de las epífisis; faltan las diáfisis. Si incluimos aquellos en que la diáfisis está partida longitudinalmente y representada por una parte de ella, el porcentaje se eleva al 94,3 por ciento; para extraer estos últimos huesos, sin romper la maltrecha diáfisis, se les cubría con escayola una vez consolidados. Las piezas óseas de hueso esponjoso, falanges, huesos del tarso y carpo nunca aparecen rotas. El medio de depósito geológico es tranquilo: las epífisis proximales y distales suelen estar cercanas. Se han observado coprolitos, posiblemente de hiena [*véase la figura 8*].

Se han localizado dos áreas de exten-

sión próxima a los 85 centímetros cuadrados, situadas hacia el centro del corte II en la base del nivel *D*, que contiene múltiples esquirlas óseas, de tamaño entre uno y cinco centímetros, con predominio de las más pequeñas y pertenecientes como mínimo a dos diáfisis. Estas condiciones no se habrían conservado hasta la actualidad si el medio hubiese sufrido cualquier leve agitación durante el depósito.

De acuerdo con los datos obtenidos, ¿cuál fue la actividad del hombre en el yacimiento? Las épocas cuaternarias europeas anteriores al yacimiento de Mauer (Alemania), datado en 500.000 años de cronología absoluta, carecen de restos fósiles atribuibles al género *Homo*; en este yacimiento, lamentablemente, falta la industria lítica; hay que ascender en el tiempo hasta los 400.000 años para encontrar en Hungría occidental, al oeste de Budapest, el yacimiento de Vértesszöllös, con presencia humana y una industria segura formada de guijarros retocados (*chopper* y *choppingtools*) y lascas clactonienses. Las industrias líticas europeas anteriores a Mauer mencionadas en la bibliografía antigua, con la excepción de la recogida en Vallonnet (Francia), no representan otra realidad que indicios probables; ante esta falta de datos, los prehistoriadores sustituían la escasez de información disponible con una argucia metodológica que si bien es racionalmente lógica, pueden sus conclusiones, en ocasiones, no ser ciertas. Esta metodología consiste en estudiar los hombres del cuaternario antiguo con la óptica que nos facilitan los numerosos datos conocidos sobre sus descendientes inmediatos, los cazadores del paleolítico superior. De ahí se desliza falazmente el principio según el cual ambos grupos humanos realizan actividades homólogas, incipientes en el más primitivo, es decir, menos complejas y de menor alcance. Así, una vez conocido que el hombre paleolítico daba batidas de caza, se piensa que los primitivos Arcantrópidos hacían algo semejante, aunque carentes de la organización necesaria, de forma fortuita, casi instintiva y sobre manadas poco numerosas. Los conceptos así elaborados han influido mucho en la visión dominante en paleontología.

En ese contexto interpretativo, el yacimiento de Cúllar de Baza-I se explicaría como sigue: el hombre llegó al lugar a cazar animales que hubiesen quedado atrapados en las arcillas del lago, lo que le resultaría más fácil que hacerlo en



7. INDUSTRIA OSEA, representada en estas dos piezas. Se recuperaron durante los trabajos de laboratorio al examinar los materiales óseos. El fragmento Ba-9 (*abajo*) pertenece al corte I y el Ba-79 (*arriba*) al corte II. Ambos se hallan situados hacia la base del nivel *D*, inmediato superior al *C*. El Ba-9 mide ocho centímetros de largo por 1,4 centímetros de anchura máxima. Consta de tres caras: la natural de la diáfasis del hueso y las dos restantes, iguales y biseladas, confiriendo al artefacto una forma triédrica. El fragmento Ba-79 posee una forma de triángulo isósceles; mide cinco centímetros de altura por dos centímetros y medio de base; el vértice superior ha sido recortado a propósito para hacerlo así más agudo.

campo abierto. Los elementos líticos e industria ósea tendrían numerosas aplicaciones, entre las que se encontrarían con seguridad el dar muerte a los animales, trocearlos y partir los huesos para extraer la médula. Como no había guijarros en el yacimiento, debieron acarrearlos desde los afloramientos de las montañas circundantes o del lecho del arroyo más cercano, aprovechándose así del transporte fluvial, el cual se observa en la superficie de los guijarros extraídos. Sin duda, y siempre razonando de acuerdo con lo afirmado en la teoría clásica, durante las actividades enunciadas, estos hombres esparcirían los huesos por unos puntos y los concentrarían en otros; cabría la posibilidad de que algunos fuesen transportados unidos a la carne que llevaran consigo. A continuación, los cazadores abandonarían el lugar hasta que volvieran a descubrir allí otra pieza.

Sin embargo, hay matices en los datos del yacimiento que nos obligan a discrepar de esta interpretación. ¿Cómo explicar la falta de fuego en este contexto? Cazar un animal, descuartizarlo, comerlo y encender fuego durante el proceso parece más verosímil que no hacer ningún uso de él. Además, los elementos líticos son poco abundantes. Si bien con ellos es posible realizar las acciones enunciadas, resultan insuficientes para dar muerte a un animal (aunque se encuentre atrapado en la arcilla, pues raramente se quedaría inmóvil), descuartizarlo y partir los huesos para extraer la médula. No cabe explicar el escaso número de cantos por algún medio natural: por las condiciones geológicas expuestas, éstos han de permanecer in situ.

Objetan la interpretación clásica otros detalles. Verbigracia, la industria ósea. Mínima y frágil, no soporta ningún esfuerzo; cualquier objeto o material perforable por ella lo sería más cómodamente con los dedos. Serviría sólo para extraer la médula de los lugares óseos inaccesibles a la boca o los dedos. Es difícil aceptar que este hombre, en su primitividad, después de comer cierta cantidad de carne, se preocupe en tallar una pequeña punta para extraer las cantidades residuales de la médula de los huesos. Asimismo, el número de individuos parece insuficiente para las actividades de caza. A todo ello habría que agregar la distribución de elementos óseos, su proporción y las restantes pruebas que ponen en cuestión la validez de la hipótesis tradicional.

En nuestra opinión, lo único que el hombre primitivo encontró en el yacimiento fueron partes de animales muertos, que por alguna causa la laguna arrojaba a aquella zona y una vez allí quedaban estancadas tras un lentísimo movimiento en las tranquilas charcas marginales. Interesa constatar que de las tres especies de carnívoros encontrados en el yacimiento, uno es carroñero específico: la hiena, que, como muestra el coprolito, deambulaba por allí; los otros dos (lobo y zorro) no despreciarían tampoco estos restos. En el caso del lobo su pequeña y débil dentición comparada con la del actual podían empujarle más a ello.

El hombre buscó y aprovechó fundamentalmente la médula de los huesos; pudo actuar recogiendo elementos óseos cargándolos y transportándolos hasta su zona de refugio, pero optó por lo menos complicado y más cómodo: transportar uno o dos cantos desde un arroyo próximo. Los huesos están dispersos de forma aleatoria por la zona. Los parte allí donde los encuentra, succiona la médula o la extrae con los dedos. Cuando encuentra ciertos huesos finos o partes donde esto no es posible, y necesita algo más agudo, toma lo que tiene a mano, las esquirlas óseas; la mayoría de las veces, éstas no necesitarían ni ser retocadas para cumplir su misión. Aunque sí en algún caso; afortunadamente, han llegado a nosotros. Esto explica su forma adaptable a los dedos. Acabada su pitanza, el hombre abandona el lugar, los guijarros y la industria ósea. En esta hipótesis, los datos del yacimiento adquieren su justa dimensión y permiten que toda la actividad sea realizada por muy escaso número de individuos que esporádicamente se acercaban para compartir los restos que se observaban y que se hallaban en estado aprovechable.

Al considerar las opiniones vertidas a propósito del hombre de Mauer y los primeros europeos, se aprecia mejor la enorme cantidad de luz que arroja el yacimiento de Cúllar de Baza-I. No debería ser fácil ya afirmar, como seguimos leyendo en los libros, que el hombre de Mauer fue cazador; para añadir a continuación que se desconoce su método de caza, habida cuenta de la imposibilidad de las grandes batidas por falta de organización social y de un territorio de naturaleza esteparia. Los granos de polen indican para Mauer la existencia de un bosque donde la encima es dominante, hecho coincidente con nuestro yacimiento. Tampoco vale pensar que los accidentes naturales del terreno próximos a este yacimiento serían fosas artificiales, a modo de trampas de caza, o interpretar que los numerosos restos de mamíferos fragmentados e irregularmente diseminados fueran de animales cazados por los hombres y arrojados al río después de extraerles la médula. Más probable nos parece que estos hombres buscaran los restos de animales semienteros que el río dejaba en aquel lugar. El yacimiento de Cúllar de Baza-I supone un acercamiento importante e inicia una nueva manera de ver, en su actividad cotidiana, los primeros Arcantrópidos.



8. COPROLITO o excremento fósil, de hiena posiblemente. Este dato lo interpreta el paleontólogo como signo de la escasa movilidad de los sedimentos. Si el sedimento se hubiera movido, durante o después del depósito, no se habrían conservado juntas el desecho y la naturaleza arcillosa de los sedimentos.

Orbita terrestre y períodos glaciales

Desde hace mucho tiempo se consideraba, como posible causa de las épocas glaciales, las variaciones periódicas de la geometría de la órbita terrestre. La idea recibe el apoyo de una cronología más fidedigna de las glaciaciones

Curt Covey

Hace 18.000 años, los hielos cubrían una tercera parte de la superficie de la Tierra. En algunas zonas de América del Norte, su espesor alcanzaba varios kilómetros; bajaban hasta Oregón y Nueva York. La Antártida y parte de Europa y Groenlandia estaban también cubiertas de hielo. Se habían extendido los glaciares de las cordilleras, desde los Alpes hasta los Andes. Había tanta agua en forma de hielo que el nivel del mar quedaba a 100 metros por debajo de su cota actual. En total, alrededor del 5 por ciento del agua terrestre se hallaba en forma de hielo sobre los continentes. Como cabía esperar, la Tierra estaba apreciablemente más fría. La temperatura en la superficie, promediada para todo el globo y todas las estaciones, era aproximadamente cinco grados Celsius más baja que la media actual. (A efectos de comparación, las fluctuaciones de la temperatura media global de un año a otro son solamente de unas décimas de grado Celsius.)

La glaciación de hace 18.000 años constituyó el episodio más reciente de entre la decena, más o menos, que han ocurrido a lo largo del último millón de años. Aunque se han propuesto muchas teorías para explicar los períodos glaciales, las pruebas convergen mayoritariamente en favor de una de ellas: los causaron pequeñas variaciones en la inclinación del eje de la Tierra y en la geometría de su órbita alrededor del Sol. A esta explicación se la conoce por teoría de Milankovitch, en honor de Milutin Milankovitch, astrónomo yugoslavo que la defendió en la primera mitad del siglo XX. Afirma que las variaciones orbitales modifican el clima al alterar la cantidad de energía solar que la Tierra recibe a distinta latitud y en diferentes estaciones.

Durante algún tiempo se consideró que la teoría de Milankovitch no se podía someter a prueba, por la poderosa razón de que no existía una cronología suficientemente precisa de las épocas glaciales con la que se pudieran comparar las variaciones orbitales. Sin embargo, se ha podido establecer recientemente una mejor cronología gracias a nuevos datos geológicos. Se ha demostrado la existencia de una correspondencia entre la historia de los períodos glaciales y las variaciones orbitales. Además, se han propuesto mecanismos razonables para explicar cómo pequeñas variaciones en la radiación solar podrían dar lugar a amplias variaciones en el clima. Estas aportaciones han renovado el interés en la teoría y han conducido a su amplia aceptación.

La primera indicación convincente de que grandes porciones de los continentes de latitudes medias habían estado recubiertas de hielo la recogió el geólogo suizoamericano Louis Agassiz, a principios del siglo XIX. Agassiz halló rocas que el paso del hielo había rayado y pulido e identificó depósitos de arena y rocas (incluyendo cantos rodados demasiado grandes para haber sido transportados por el agua) como restos que quedaron rezagados de la retirada de los glaciares. Al ponerse de manifiesto que las formas de las tierras y sedimentos de las regiones libres de hielos pudieron ser producidas por éstos en vez de causarlas el viento y las aguas, se identificaron rastros de glaciares por toda América del Norte y Europa.

Al cartografiar los depósitos glaciales, los geólogos pronto vieron la presencia de varias capas diferentes; quedaba claro que la Tierra había sufrido muchas glaciaciones en el último millón de años. Con el tiempo, el estudio de depósitos glaciales todavía más antiguos, en particular tillitas (cementación rocosa de una mezcla de guijarros, cantos rodados y arcilla), indujo a los geólogos a concluir la existencia, mucho antes, de dos o tres episodios glaciales, por lo menos. La primera glaciación generalizada pudo haberse producido en el Precámbrico, hace más de 500 millones de años.

Digamos de paso que la expresión "período glacial" refleja, en su falta de precisión, la historia de la geología glacial. Alude tanto a un avance de las capas de hielo durante el período de clima relativamente frío que comenzó hace aproximadamente un millón de años (época del Pleistoceno), como al Pleistoceno entero y a los períodos fríos anteriores. Puesto que la teoría de Milankovitch explica las fluctuaciones del volumen de hielo una vez que el clima es relativamente frío, pero no el comienzo de tal clima, y habida cuenta de que las indicaciones de ciclos glaciales anteriores son bastante vagas, aquí usaremos "período glacial" para denotar épocas de máxima extensión de los hielos durante el Pleistoceno.

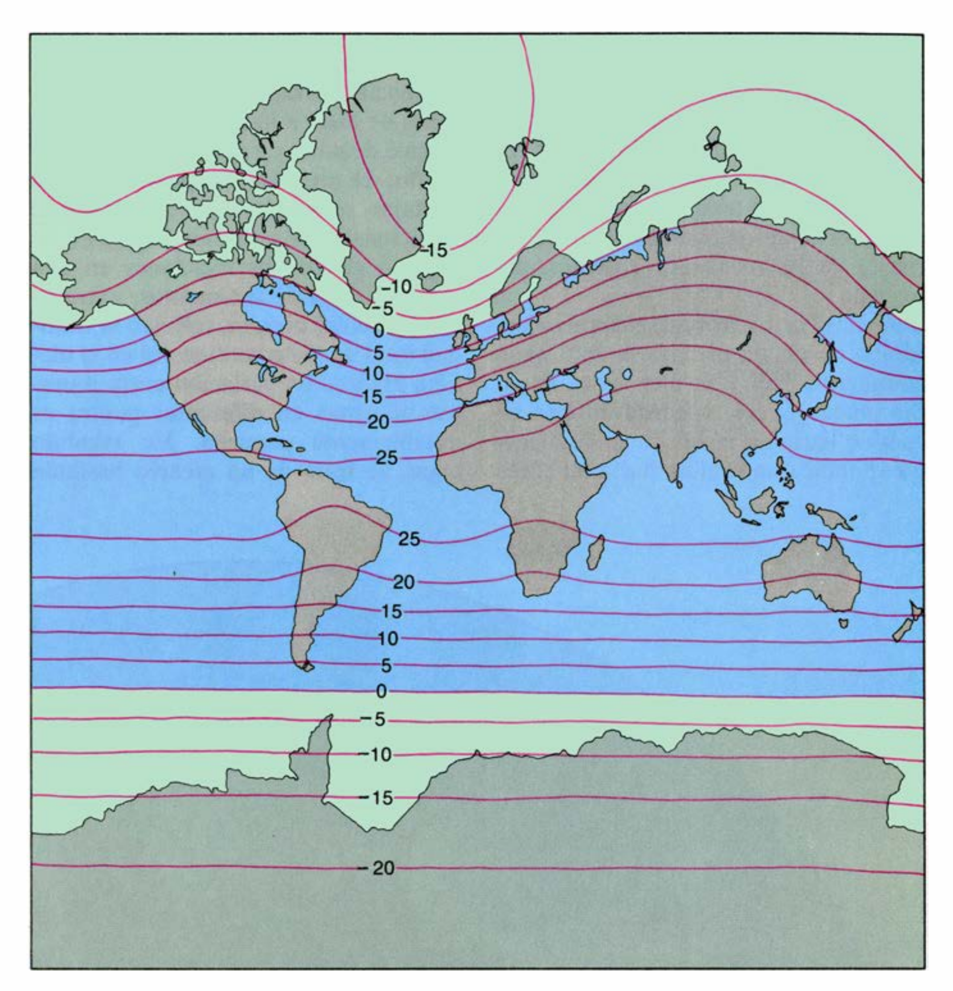
Aunque se sabe desde hace tiempo, a partir del archivo geológico, que hubo muchas épocas glaciales en el Pleistoceno, el número exacto, la fecha y la duración de las mismas se han resistido a toda determinación. Un descubrimiento reciente permite apuntalar, por fin, una cronología mejor. Del cociente de entre dos isótopos del oxígeno en los sedimentos oceánicos depositados en una época podemos deducir el volumen global de hielo en ese momento.

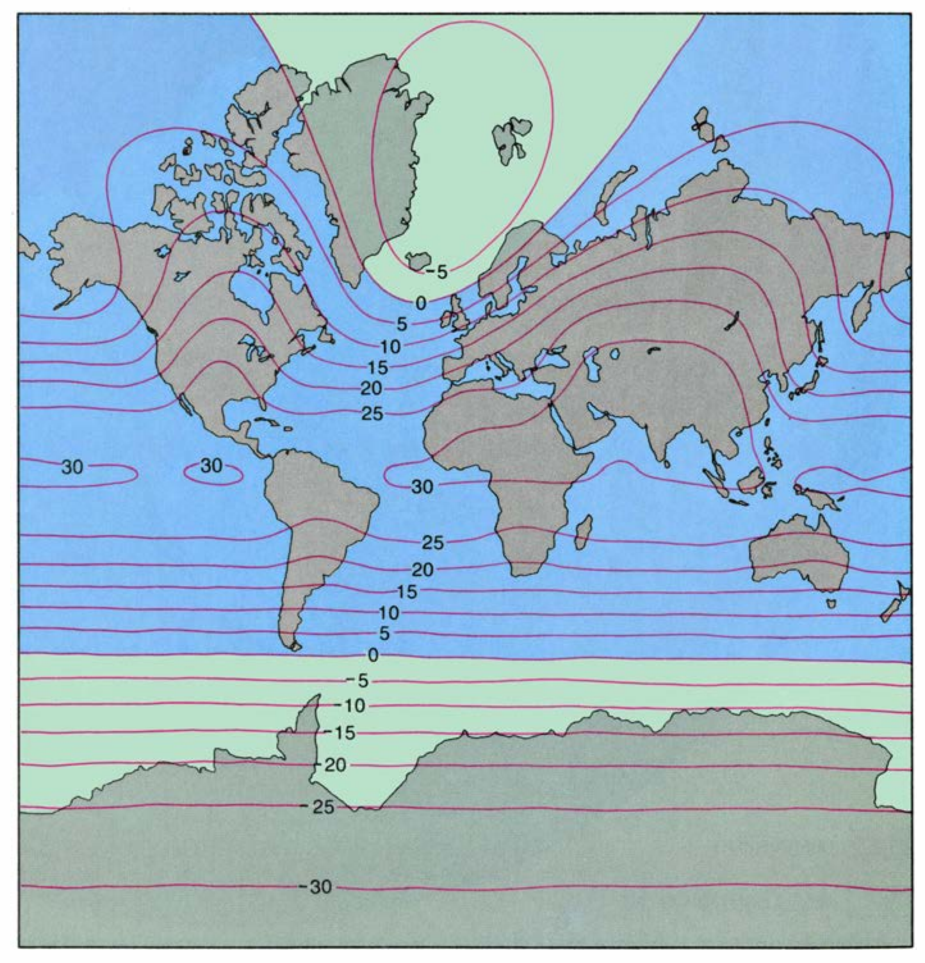
El isótopo más abundante del oxígeno es el de masa atómica 16. (El núcleo atómico está constituido por ocho protones y ocho neutrones.) Casi todo el oxígeno del agua es oxígeno 16; si bien, de cada mil, unas cuantas moléculas incorporan el isótopo más pesado, oxíge-

no 18 (el núcleo tiene dos neutrones extra). Las moléculas más pesadas se resisten a la evaporación de la superficie del océano. En virtud de lo cual, la lluvia, la nieve y el hielo formado a partir de las precipitaciones sobre tierra firme tienen menos oxígeno 18 que el agua de los océanos. Cuando comienza un período glacial, la capa de hielo continental se extiende, eliminando agua de los océanos. En consecuencia, el agua del océano se enriquece en oxígeno 18.

Por supuesto, no pueden ahora recuperarse o identificarse muestras de agua del mar de una época remota, pero sí determinarse la relación de isótopos a partir del carbonato cálcico ($CaCO_3$) de las conchas de los organismos marinos, que se forman con los átomos de oxígeno del agua y reflejan la composición isotópica de ésta. Las conchas de los organismos caen al fondo del océano y se acumulan para formar sedimentos. Cuanto más alta es la relación de oxígeno 18 a oxígeno 16 en una muestra sedimentaria, tanto más hielo terrestre había cuando se formó el sedimento.

La complejidad de la secuencia de sucesos registrada por los isótopos limita las conclusiones a deducir de los datos sedimentarios. El grado en que la evaporación del agua y la precipitación de la nieve seleccionan los isótopos depende de muchos factores, no bien conocidos. Stephen H. Schneider, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica, y el autor han encontrado que el grado de separación isotópica depende, en parte, de la distancia vertical que ha de recorrer el vapor de agua antes de condensarse en forma de lluvia o nieve. Se desconoce cómo difería la circulación atmosférica en una época glacial respecto a la actual; el factor altura añade, pues, cierta incertidumbre a la interpretación de los datos isotópi-



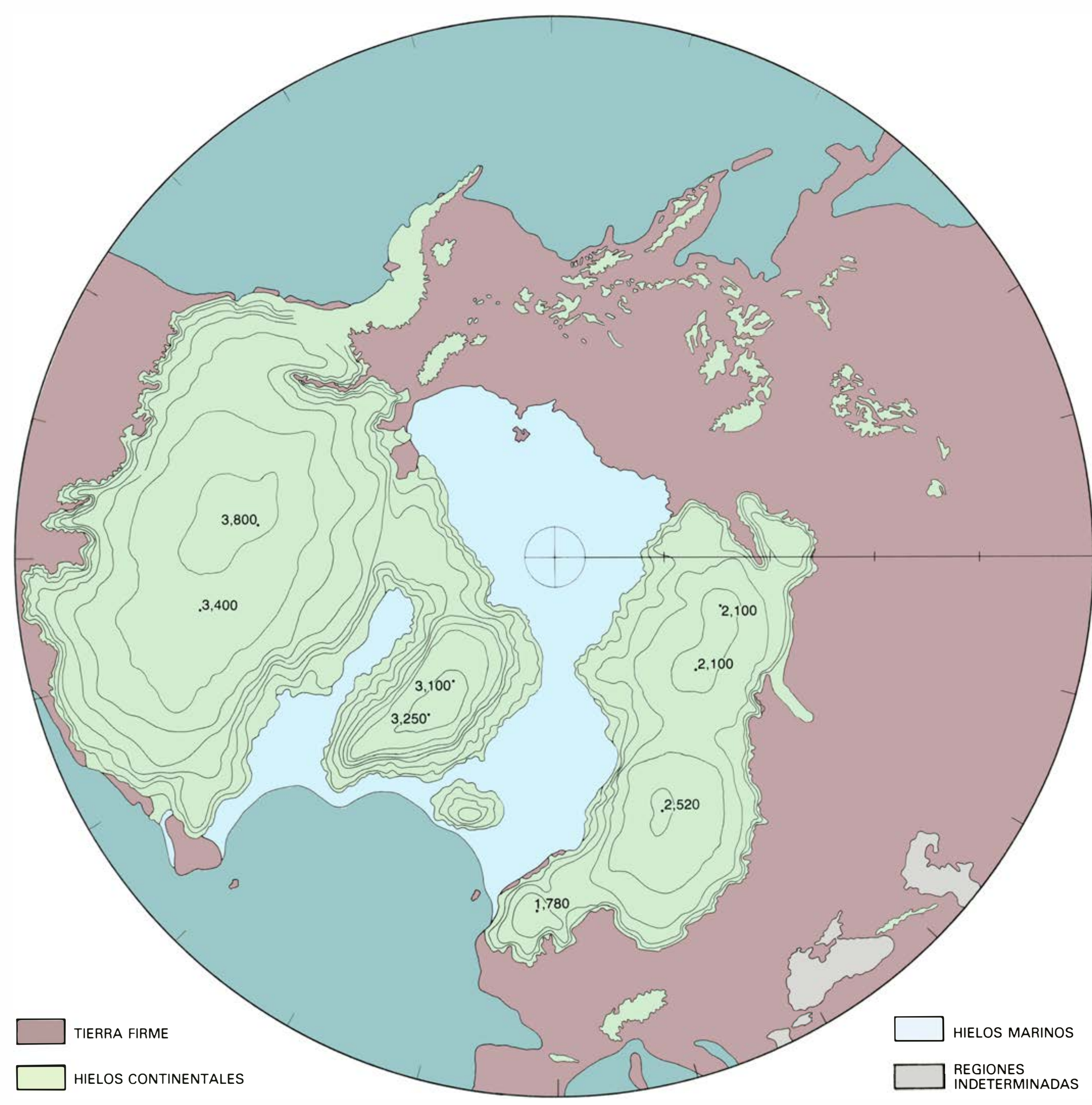


1. SIMULANDO EL CLIMA se aprecia cómo pequeñas variaciones cíclicas de la órbita terrestre pueden bastar para provocar los períodos glaciales. Los cambios en la órbita alteran la cantidad de energía solar que llega a diversas partes de la superficie terrestre. El factor más importante es la insolación estival a latitudes septentrionales altas; si la temperatura del verano permanece por debajo de los cero grados Celsius, el hielo puede acumularse de un año a otro. Los mapas muestran las temperaturas de julio, predichas por un modelo climático elaborado por Gerald R. North, David A. Short y John G. Mengel. En la configuración de la órbita hace 115.000 años (*mapa superior*), el modelo predice condiciones de época glacial para gran parte de Norteamerica y porciones de Eurasia. Con los parámetros actuales de la órbita terrestre (*mapa inferior*), la temperatura de julio queda por debajo de cero sólo en Groenlandia y la Antártida.

cos. Pero se sabe que la composición isotópica de las conchas de carbonato depende de la temperatura del agua en la que se formó la concha. Cuando el océano está más frío, se incorpora en las conchas más oxígeno 18. Se supone que el efecto de temperatura da cuenta de un tercio aproximadamente de la variación de las relaciones isotópicas del oxígeno.

A causa de efectos así, el archivo isotópico no puede precisar cuánto hielo continental había en una época dada. Sin embargo, hay acuerdo en que un cambio hacia un mayor nivel de oxígeno 18 indica un cambio hacia un clima más frío y glacial; el archivo sí proporciona la mejor manera de determinar la secuencia de avances y retrocesos de las capas de hielo a lo largo de los últimos cientos de miles de años. Para este propósito, el archivo isotópico tiene dos ventajas sobre datos geológicos más tradicionales. En primer lugar, es un registro global: las relaciones en una muestra dada de sedimentos, extraída del fondo del océano, reflejan la cantidad total de hielo continental en el planeta entero. La variación entre muestras tomadas en diferentes puntos es notablemente pequeña. En segundo lugar, se trata de un archivo bastante continuo: la secuencia de sedimentos oceánicos presenta muchas menos lagunas que el archivo de las rocas sobre tierra firme.

Los cambios de clima que han quedado registrados en los sedimentos oceánicos pueden datarse con suficiente exactitud y poner a prueba la teoría de Milankovitch por métodos radiométricos. Estos métodos requieren también la medida de relaciones isotópicas; los isótopos –a diferencia del oxígeno 18 y oxígeno 16– son radiactivos, y su constante desintegración marca el transcurso del tiempo desde la formación de los sedimentos. Estableciendo las fechas



2. CAPAS DE HIELO de varios kilómetros de espesor cubrían el hemisferio Norte hace 18.000 años, en la plenitud del último período glacial (*izquierda*). Se había transferido tanta agua de los océanos al hielo que Siberia y Norteamérica estaban unidas por un puente de tierra. Hoy (*derecha*) sólo Groenlan-

de unos pocos puntos de cada muestra, puede construirse una línea temporal en la que se recojan las variaciones isotópicas del oxígeno.

El archivo isotópico así fechado y construido muestra cómo el volumen global de hielo aumentó y disminuyó repetidamente en los últimos cientos de miles de años. Las fluctuaciones siguen una pauta bastante regular: cada 100.000 años se produce una época glacial. Esta regularidad, sin embargo, no es tajante. Los máximos de la curva tienen una forma asimétrica, en diente de sierra, lo que manifiesta que los hielos tardan mucho más en formarse que en desaparecer. Hay, además, muchas fluctuaciones pequeñas superpuestas al ciclo principal de 100.000 años.

Nos sugiere esta pauta que el clima ha venido respondiendo a alguna oscilación "impulsora" continuada. Factor impulsor que podría ser, como más obvio, la variación acontecida en la cantidad de luz solar recibida por la Tierra, cuya causa más inmediata había que buscarla en las oscilaciones en la producción energética del Sol. Los instrumentos a bordo de satélites han comenzado ya a suministrar una información precisa del flujo de energía que la Tierra recibe del Sol; hasta ahora, no existen indicaciones firmes de variaciones apropiadas, a largo plazo, en la producción energética del Sol. La teoría de Milankovitch propone un mecanismo mucho más accesible a la observación y al cálculo. Aun cuando la energía emitida por el Sol se mantuviera constante, la insolación global variaría con la distancia entre Tierra y Sol y la insolación a una latitud dada variaría con la orientación de la Tierra respecto al Sol.

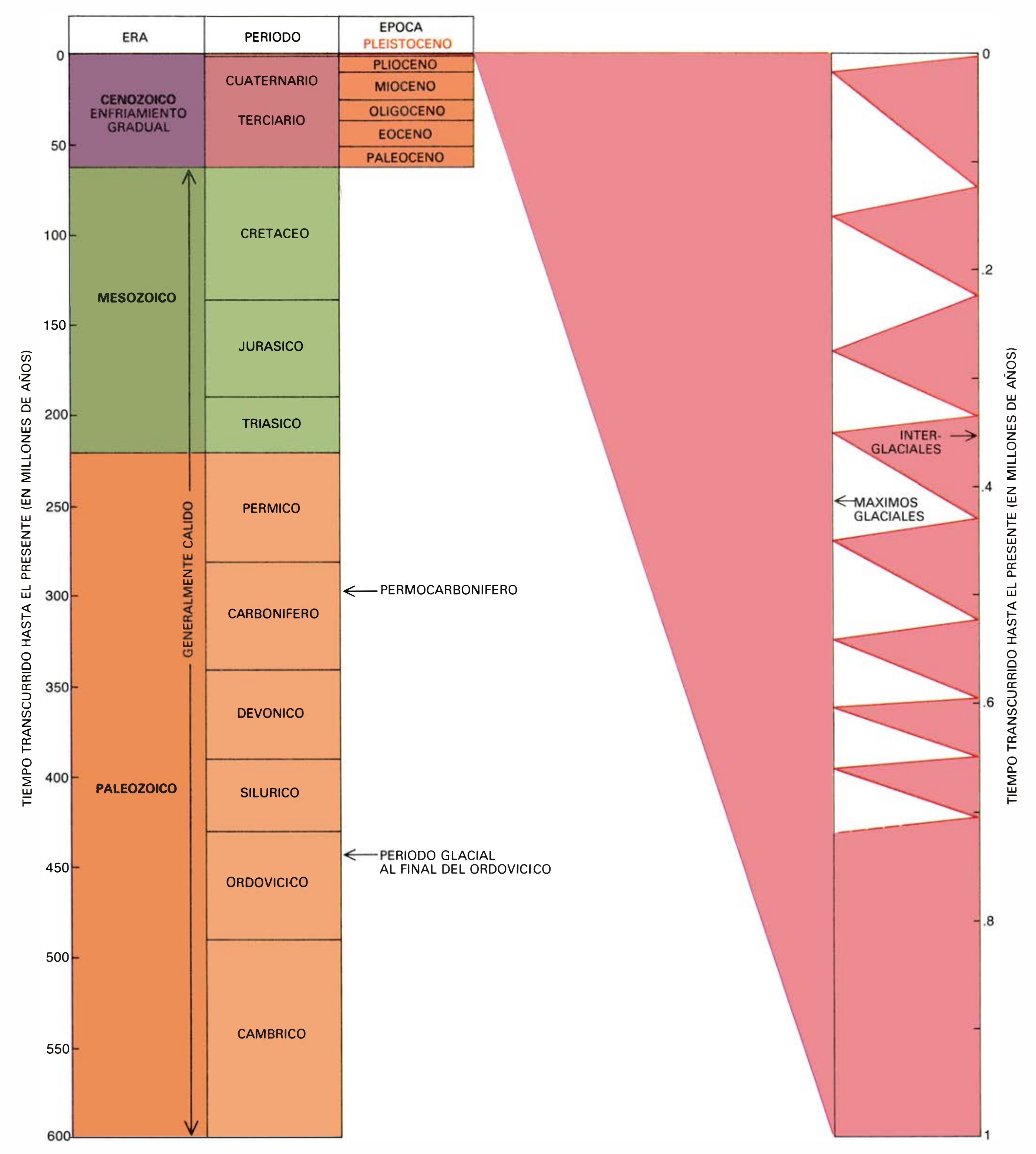
Un ejemplo familiar de las variaciones de la insolación y de sus efectos sobre el clima es el ciclo estacional. La



dia y la Antártida están cubiertas de hielo. Los mapas se han basado en los preparados por miembros del proyecto CLIMAP. La distribución de hielos durante el último período glacial se basa en la distribución de sedimentos y de formas de tierras glaciales y en indicaciones suministradas por los fósiles.

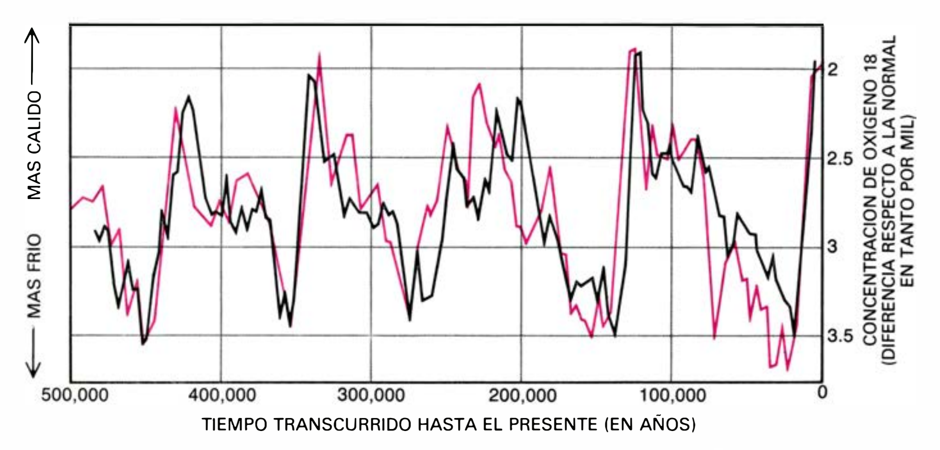
Tierra experimenta cambios estacionales por una razón principal: su eje de rotación está inclinado con respecto a la perpendicular al plano de la órbita. Durante junio, julio y agosto, el hemisferio Norte apunta hacia el Sol y recibe más radiación solar de la que recibiría si el eje de la Tierra fuera perpendicular al plano de la órbita; el hemisferio Sur recibe menos radiación solar. Seis meses más tarde, cuando la Tierra se ha movido 180 grados a lo largo de su órbita, la situación se invierte.

Hay un factor adicional que modifica ligeramente el ciclo estacional. La órbita terrestre es una elipse, no una circunferencia; la distancia de la Tierra al Sol varía, pues, con la época del año. En enero, la Tierra está en la posición más próxima al Sol (perihelio) y, en julio, en la más lejana (afelio). De acuerdo con ello, la insolación global es ligeramente mayor en enero que en julio. Este efecto proporciona al hemisferio Norte inviernos más templados y veranos más frescos que los que tendría si la órbita fuese circular.



3. CRONOLOGIA ABREVIADA DEL CLIMA TERRESTRE durante los últimos 570 millones de años de los 4600 en que se cifra su historia. En un pasado remoto, el clima fue, en general, más cálido de lo que es hoy, aunque existen indicaciones de que hubo capas de hielo durante partes de los períodos Precámbrico, Ordovícico y Permocarbonífero. El clima empezó a enfriarse a finales del Cretácico, hace unos 65 millones de años; las primeras capas de hielo permanentes aparecieron, probablemente, durante el Oligoceno, en la era Terciaria. El ciclo más reciente de períodos glaciales, los del Pleistoceno, comenzó hace un millón de años. El Pleistoceno ha conocido unos 10 períodos glaciales; la Tierra se encuentra atravesando ahora un período interglacial.

A efectos de explicar la insolación, se necesitan tres magnitudes para especificar la órbita terrestre. En primer lugar está la oblicuidad, o ángulo de inclinación del eje de la Tierra respecto al plano de su órbita; la oblicuidad es hoy de 23,5 grados. Una segunda magnitud, la excentricidad orbital, mide la desviación de la órbita terrestre respecto a una circunferencia perfecta. Una circunferencia tiene excentricidad nula, en tanto que una elipse cuyo eje mayor doblase el menor tendría una excentricidad de 0,866. En el momento presente, la excentricidad de la órbita terrestre es de 0,017. En tercer lugar, al girar la Tierra sobre sí misma, la dirección a la cual apunta su eje sufre una lenta precesión, describiendo un círculo respecto a la referencia fija de las estrellas lejanas. El eje terrestre apunta ahora a la Estrella Polar.



4. RELACION DE DOS ISOTOPOS DEL OXIGENO en los sedimentos oceánicos; mide el volumen global de hielo en el pasado. El oxígeno 18, isótopo pesado del oxígeno, aparece menos en el agua del hielo glacial que en la oceánica. Por tanto, cuando se forman capas continentales de hielo, el agua oceánica y las conchas de los organismos marinos caídas en los sedimentos oceánicos aparecen enriquecidas en oxígeno 18. Cuanto mayor sea la concentración de oxígeno 18 en una capa sedimentaria, más hielo terrestre hubo cuando se depositó la capa y más frío era el clima. Se muestran dos conjuntos de datos isotópicos; cada grupo está formado por medidas de varias muestras de material sedimentario extraído del fondo oceánico. Uno de ellos fue recopilado por James D. Hays, adscrito al Observatorio Geológico Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia (*negro*), y el otro por Cesare Emiliani, de la Universidad de Miami (*color*). Las curvas mantienen una estrecha semejanza, aun cuando las muestras se tomaron en puntos muy separados; se cree, por tanto, que las relaciones de isótopos sedimentarios reflejan el volumen global de hielo. Nótese que hoy día hay menos hielo que en los últimos 120.000 años. (Dibujos de A. Tomko.)

Debido a la atracción gravitatoria, pequeña, de la Luna y de los otros planetas, los parámetros orbitales de la Tierra varían con el tiempo. Las variaciones casi periódicas ocurridas durante los últimos cientos de miles de años pueden calcularse con gran precisión. La inclinación del eje terrestre varía entre 22,1 y 24,5 grados, con un período de unos 40.000 años; la excentricidad de la órbita lo hace entre 0,005 y 0,06 aproximadamente, con un período de unos 100.000 años. El eje terrestre tarda unos 26.000 años en describir una circunferencia de precesión completa.

La variación de los parámetros orbitales de la Tierra produce las correspondientes variaciones en la cantidad de radiación solar recibida a una latitud dada y en una cierta época del año. La idea de que esas lentas fluctuaciones de la energía solar recibida sean responsables del avance y retroceso de los hielos se lanzó casi en el mismo momento de descubrirse los períodos glaciales, en el siglo XIX. Pero el mayor mérito de la hipótesis orbital corresponde a Milankovitch. En los años veinte y treinta calculó laboriosamente las variaciones de insolación resultantes de las variaciones orbitales, y sugirió formas posibles en que tales fluctuaciones condicionaban el clima.

Las variaciones de los parámetros orbitales de la Tierra conducen, principalmente, a variaciones en la intensidad del ciclo estacional. El aumento de la inclinación del eje terrestre refuerza los rigores del ciclo: los inviernos se hacen más fríos y los veranos más cálidos en ambos hemisferios. El efecto de la precesión sobre la insolación es menos directo; ahora bien, junto con la rotación de la eclíptica alrededor del Sol, determina la fecha del perihelio. La variación de éste abarca un período de 20.000 años aproximadamente, algo menor que el propio período de precesión. En general, una variación en la fecha del perihelio aumenta la intensidad de las estaciones en un hemisferio y la disminuye en el otro. El perihelio ocurre ahora el 3 de enero; así pues, el invierno del hemisferio Norte es ligeramente más templado de lo que podría ser, y el verano del hemisferio Sur es algo más fresco. En unos 12.000 años, cuando el eje de la Tierra deje de apuntar hacia la Estrella Polar para mirar hacia Vega, la situación se invertirá.

La excentricidad de la órbita terrestre ejerce dos efectos bien definidos sobre la insolación. Cuanto mayor es la excentricidad de la órbita, tanto mayor es la diferencia entre la máxima y la mínima distancia de la Tierra al Sol y, con ello, tanto mayor es la amplitud del efecto de precesión. La insolación anual total varía también con la excentricidad de la órbita. Pero es un efecto pequeño; por mor de esa variación de la excentricidad la insolación global ha cambiado, a lo sumo, en un 0,3 por ciento a lo largo del último millón de años. Y según la mayoría de los cálculos, una variación del 0,3 por ciento en la insolación global modificaría la temperatura media en sólo unas décimas de grado.

Resumiendo, la excentricidad origina pequeños cambios en la insolación global anual, mientras que inclinación y precesión alteran solamente la distribución de la insolación con la estación del año y la latitud, pero no la insolación total. Si ello es así, ¿cómo pudieron las variaciones orbitales causar esos bruscos cambios de clima que acompañaron al avance y retirada de los hielos? Milankovitch mantenía que la fuerza que impulsó las épocas glaciales no era la insolación total, sino la insolación en las altas latitudes del hemisferio Norte durante el verano, que varía hasta en un 20 por ciento, mucho mayor que la oscilación de la insolación total. Si se acepta este argumento, resulta mucho más razonable suponer que las variaciones orbitales producen las épocas glaciales.

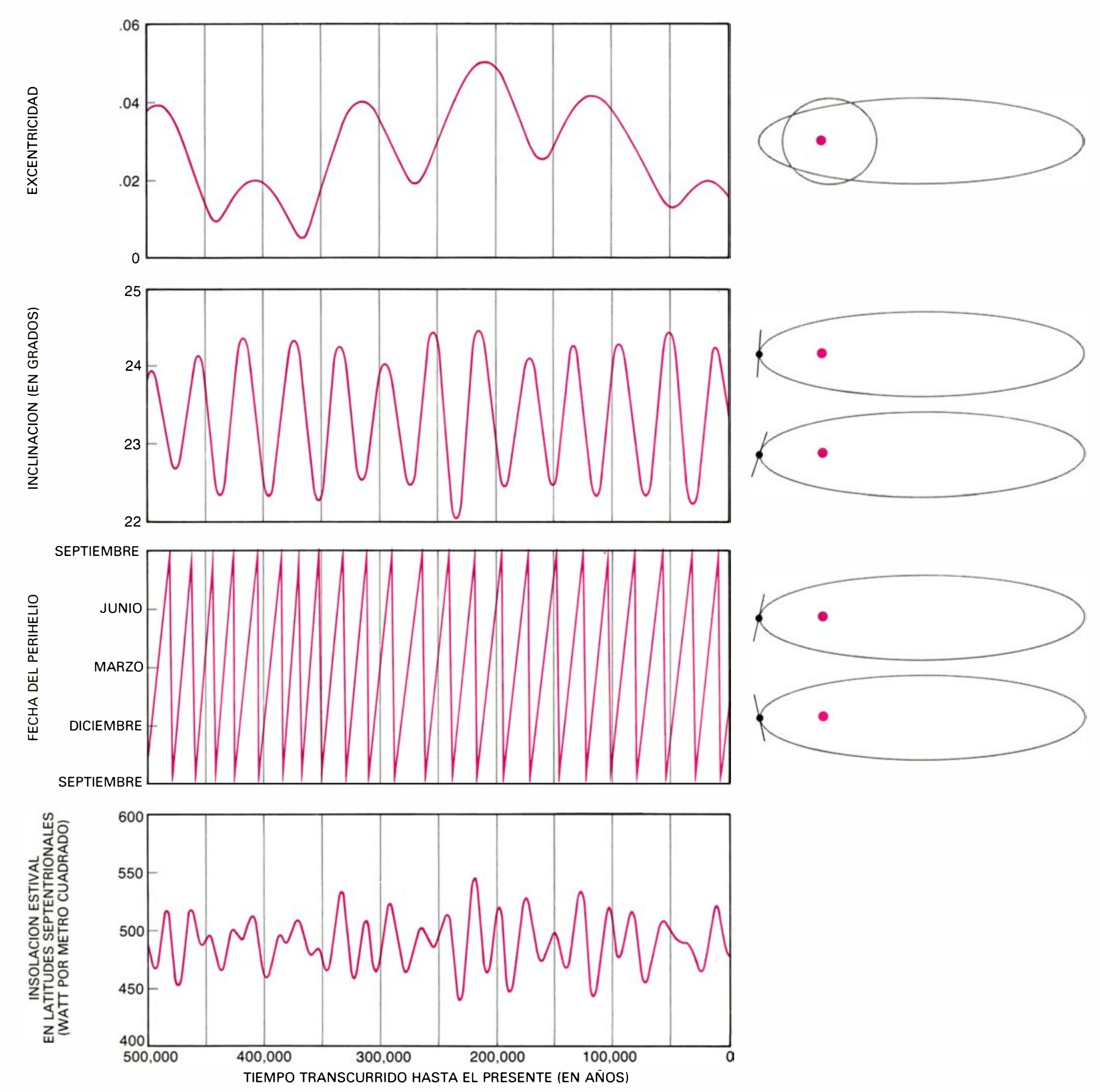
La insolación estival es más importante que la insolación invernal porque la nieve se acumula en las altas latitudes, incluso durante los inviernos suaves. Lo que cuenta no es la nieve acumulada durante el invierno, sino la conservada durante el verano. Si en las altas latitudes se recibe en verano menos radiación solar de la normal, la nieve tenderá a conservarse. Si la situación persiste durante muchos años, se forma hielo al comprimirse la nieve bajo su propio peso, empezando a formarse las capas continentales de hielo; la Tierra entra en un período glacial. Por el contrario, si la cantidad de radiación solar recibida durante el verano aumenta, se funde más hielo del que las nevadas invernales remplazan, y la Tierra retorna a un clima similar al actual.

Por otro lado, la insolación en el hemisferio Norte es más importante que en el hemisferio Sur: los glaciares pueden formarse sólo en el continente, y en la actualidad hay en el hemisferio Norte grandes masas de tierra a altas

latitudes. En el hemisferio Sur, el único continente a altas latitudes es la Antártida, permanentemente cubierta de hielo. Una disminución de radiación solar en el hemisferio Sur no contribuiría tanto a hacer variar el clima hacia una época glacial.

Dos razones explican el escepticismo que, durante mucho tiempo, rodeó la teoría orbital de los períodos glaciales. En primer lugar, no se veía claro que la teoría concordara con el registro geológico. En segundo lugar, parecía poco plausible que pequeñas variaciones en la insolación desencadenaran grandes cambios en el clima. Hubo que esperar hasta los últimos diez años para que se acumularan las pruebas que corroboraran la existencia de una relación entre las épocas glaciales y la órbita, y ante cuya solidez se convencieran geólogos y geofísicos.

Entre las pruebas están las periodicidades en los sedimentos del fondo de los lagos, denominados varvas, cuya deposición controlan las estaciones. También se han observado periodicidades en los sedimentos oceánicos constituidos por organismos marinos que pre-



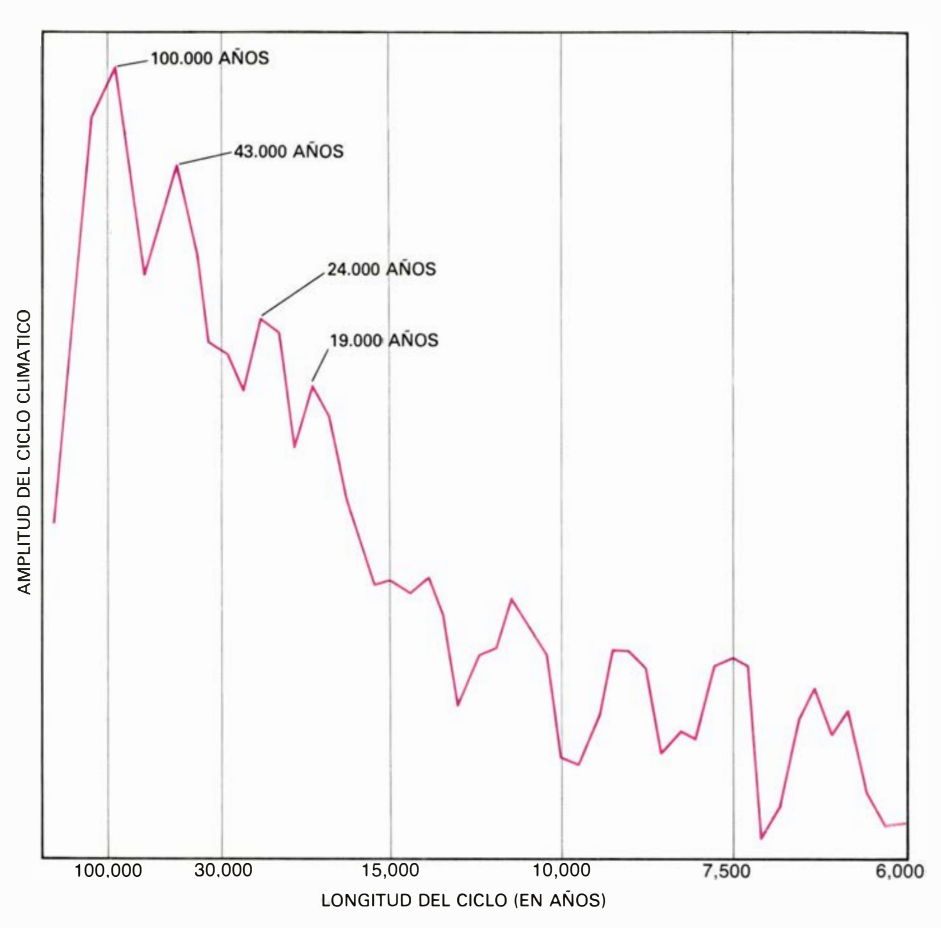
5. LA TEORIA DE MILANKOVITCH, formulada por el astrónomo yugoslavo Milutin Milankovitch, atribuye el comienzo de los períodos glaciales a variaciones de tres parámetros de la órbita terrestre. La excentricidad es el grado de desviación de la órbita respecto a una circunferencia. Se llama ángulo de inclinación al formado por el eje de la Tierra y la perpendicular al plano de su órbita. La fecha del perihelio determina la dirección hacia la que apunta el eje cuando la Tierra alcanza el punto más próximo al Sol. Cada uno de los parámetros varía lentamente bajo la influencia de la atracción gravitatoria de la Luna y de los planetas. Las variaciones en los parámetros orbitales modifican la cantidad de luz solar recibida por la Tierra; la insolación anual global cambia poco, pero hay grandes variaciones de la insolación estival en altas latitudes. Las variaciones de excentricidad, inclinación y fecha del perihelio se calcularon con un método desarrollado por André Berger. Las épocas de máxima excentricidad están separadas entre sí por períodos de unos 100.000 años, aunque la excentricidad tiene un segundo período de unos 400.000 años. Los ciclos de inclinación y fecha del perihelio tienen períodos de unos 40.000 y 20.000 años, respectivamente. La fecha del perihelio tampoco es una curva sinusoidal simple; consta de dos ciclos de 19.000 y 23.000 años. Se muestra la variación en la cantidad de luz solar recibida en la zona entre 60 y 70 grados de latitud Norte en julio. La insolación se calculó mediante un programa de ordenador escrito por Tamara S. Ledley, del Instituto de Massachusetts, y Stanley L. Thompson, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica.

fieren aguas más templadas o más frías. Sin embargo, la prueba decisiva proviene del examen de las relaciones isotópicas de los sedimentos oceánicos. En 1976, James D. Hays, del Observatorio Geológico Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, John Imbrie, de la Universidad Brown, y Nicholas J. Shackleton, de la Universidad de Cambridge, publicaron un estudio del archivo isotópico. Hays, Imbrie y Shackleton pretendían establecer qué proporción de la fluctuación del volumen global de hielo podía atribuirse al ciclo de 100.000 años de la excentricidad de la órbita terrestre, cuál al ciclo de 40.000 años de la inclinación del eje y cuál al ciclo de 20.000 años de la precesión. Enfocaron la cuestión sometiendo la curva de volumen del hielo a análisis de Fourier, técnica comúnmente empleada para detectar variaciones cíclicas y para definir el período o períodos de oscilación.

El matemático francés Jean-Baptiste Joseph Fourier demostró, en 1807, que la curva de casi cualquier función podía representarse con el grado de aproximación que se deseara superponiendo curvas sinusoidales y cosinusoidales de diversas fases, amplitudes y frecuencias; este proceso constituye la llamada síntesis de Fourier. En el proceso inverso, que generalmente se lleva a cabo con ordenador, se descompone una curva compleja en ondas sinusoidales y cosinusoidales simples: la amplitud y la fase de cada componente de frecuencia se eligen de manera que la suma de las ondas dé la mejor aproximación posible a la curva medida. El resultado de un análisis de Fourier suele representarse en forma espectral, dando la amplitud total en función de la frecuencia o del período. Si existe un máximo destacado en el espectro, por ejemplo en los 100.000 años, la información podrá explicarse, en buena medida, con un ciclo de 100.000 años.

El análisis espectral pone de relieve cierto número de frecuencias definidas en la curva del volumen de hielo. La frecuencia más visible corresponde, de hecho, al ciclo de 100.000 años, pero hay máximos secundarios en períodos de unos 40.000 y de unos 20.000 años. En total, alrededor del 60 por ciento de la fluctuación de la curva puede expresarse como suma de funciones con los mismos períodos que los parámetros orbitales. Esta es una poderosa prueba a favor de la teoría de Milankovitch.

Aunque las pruebas geológicas son convincentes, resultan limitadas en su carácter circunstancial; no desentrañan el mecanismo a través del cual una variación de la insolación causa una variación en el volumen del hielo. Se están ensayando mecanismos plausibles mediante modelos matemáticos del clima.



6. REPRESENTACION ESPECTRAL que muestra la amplitud y frecuencia de las ondas sinusoidales, cuya suma aproxima mejor la curva deducida de la relación de isótopos del oxígeno. Las componentes con amplitudes máximas tienen frecuencias próximas a las de los parámetros orbitales; las cuatro rotuladas dan cuenta de un 60 por ciento de la fluctuación observada en el registro de isótopos del oxígeno.

Abundan los modelos climáticos; los hay constituidos por una sola ecuación para las temperaturas promediadas global y anualmente, ecuación que puede resolverse con una calculadora; los hay también mucho más complejos, como los modelos de la circulación general, que permiten una representación detallada de las temperaturas, los vientos y otras variables meteorológicas y de sus variaciones con el tiempo, la longitud, la latitud y la altura. La mayoría de los modelos climáticos requieren extensos cálculos numéricos; para los modelos de circulación general, los ordenadores más rápidos tardan horas en simular las variaciones climáticas en el curso del año. De lo que se desprende que para abordar el estudio de la evolución del clima a lo largo de los últimos cientos o miles de años habrá que recurrir a modelos simplificados.

La clase de modelo climático más apropiada para estudiar las teorías de los períodos glaciales es el modelo de balance energético, que, en última instancia, se funda en la ley de la conservación de la energía. Las condiciones físicas se definen sólo en puntos discretos de la superficie terrestre, generalmente en los vértices de una rejilla. La velocidad de variación de la temperatura en cada punto se obtiene sustrayendo repetidamente, de la energía solar incidente, la energía infrarroja emergente y añadiendo a la diferencia toda energía procedente de los puntos adyacentes. La simplificación que hace posible resolver los modelos de balance energético con rapidez suficiente para simular los ciclos glaciales reside en el tratamiento del transporte de energía entre puntos de la rejilla. Se supone que el transporte sigue una ley sencilla, del tenor siguiente: "El calor fluye de los puntos más calientes a los más fríos, a una velocidad proporcional a la diferencia de temperatura". En realidad, los vientos y las corrientes que transportan el calor recorren caminos complicados y, a menudo, imprevisibles. Pese a ello, los modelos de balance energético simulan con éxito las variaciones de temperatura con la latitud y la estación del año: pueden simular, pues, las variaciones climáticas que tengan la misma causa que las variaciones estacionales.

Los experimentos realizados con modelos de balance energético acaban de mostrar dos cosas: que la compulsión orbital podría producir grandes cambios en el clima y originar un ciclo climático con un período de 100.000 años. Un modelo desarrollado por Gerald R. North y David A. Short, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard, de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), y John G. Mengel, de la Applied Research Corporation, revela que bastan pequeñas disminuciones de la insolación para provocar glaciaciones generalizadas. Como sugirió Milankovitch, la clave reside en la insolación a altas latitudes septentrionales.

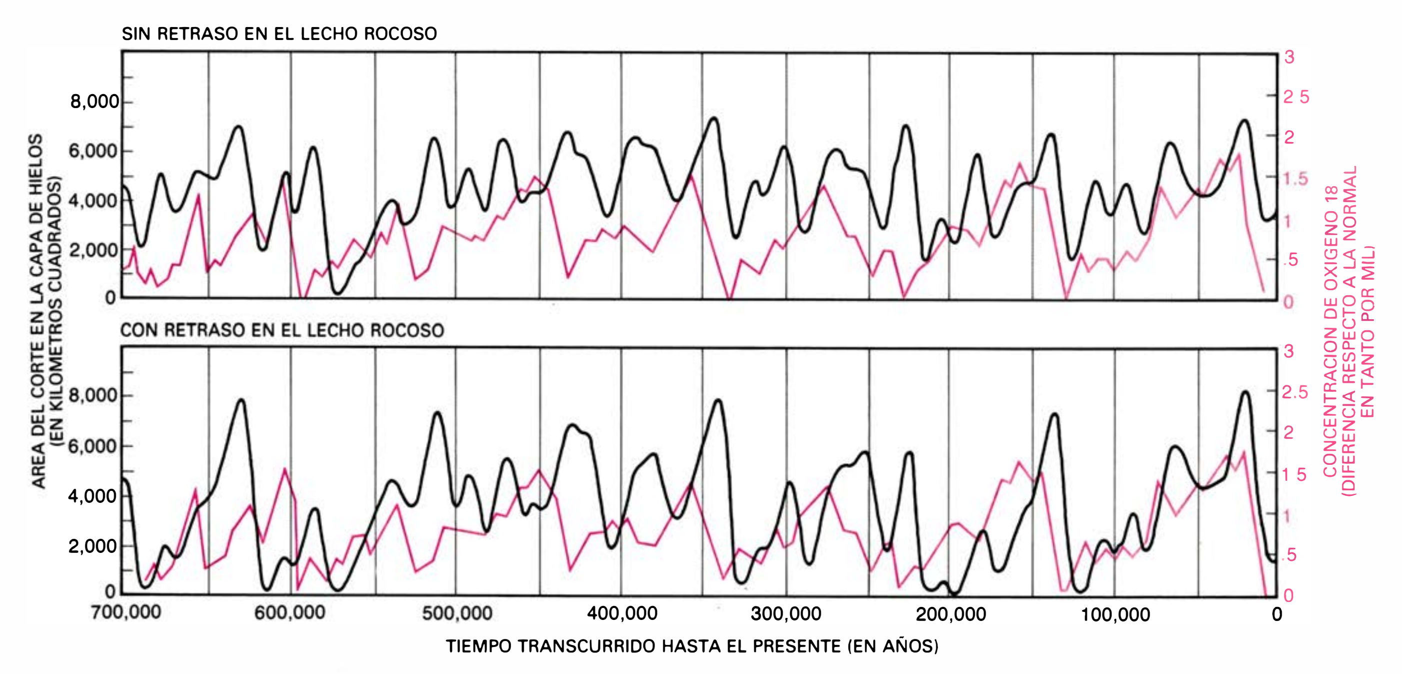
North y sus colaboradores tenían sus dudas de que los modelos climáticos lograran predecir correctamente los cambios en el volumen de los hielos, ya que los continentes se representaban allí a través de una sola extensa masa de tierra. Y descubrieron que un modelo que contara con una distribución más realista de tierras y mares resultaba más sensible a las variaciones en la insolación. Además, predecía distribuciones de hielos como las que nos ofrecen los registros geológicos. Así, cuando la insolación de hace 115.000 años, al comienzo de un período glacial, se introdujo en el modelo, éste predijo que los hielos crecerían en las latitudes septentrionales, particularmente en América del Norte. Pronosticaba también una menor acumulación de hielo en Eurasia, en razón de su extensión mayor. El interior de Eurasia, alejado de la influencia moderadora de los océanos, experimenta mayores extremos estacionales de temperatura, y los veranos, relativamente cálidos, funden el hielo que se acumula en los inviernos.

Este descubrimiento deja todavía sin justificar esa nítida oscilación de 100.000 años en el ciclo de los períodos glaciales. En muchos aspectos, se trata del aspecto más intrigante del problema. La variación de la excentricidad de la órbita terrestre tiene un período de 100.000 años, pero la distribución de la insolación, que parece constituir el mecanismo impulsor de los cambios climáticos, queda mucho más afectada por la inclinación y la precesión que por la excentricidad. ¿Por qué el registro muestra que el ciclo de 100.000 años es más intenso que el de 40.000 años, correspondiente a la inclinación, y el de 20.000, de la precesión?

La respuesta quizá se esconda en el fenómeno de la resonancia, una propiedad característica de muchos sistemas físicos. El péndulo suministra un ejemplo sencillo. Si ponemos en movimiento un péndulo y lo abandonamos, oscilará con una frecuencia que dependerá sólo de su longitud y de la intensidad de la fuerza gravitatoria. Con una sucesión de impulsos cronometrados se le puede obligar también a que oscile; en cuyo caso, la frecuencia dependerá de la frecuencia de los impulsos, que no tiene por qué coincidir con la frecuencia natural. Aun así, la amplitud de la oscilación, o respuesta del sistema, aumentará a medida que la frecuencia de los impulsos se acerque a la frecuencia natural del péndulo. Este aumento de la amplitud de la respuesta constituye una resonancia.

Cabe admitir que el sistema climático compuesto por la atmósfera, los océanos, los continentes y las capas de hielo tenga una frecuencia de oscilación natural, o preferida, con un período aproximado de unos 100.000 años. La excentricidad puede variar la insolación menos de lo que lo hace la inclinación o la precesión, pero su acción quizá resulte más eficaz a la hora de cambiar el clima, por la sencilla razón de que tales variaciones tienen una frecuencia próxima a la frecuencia natural del sistema.

Varios investigadores, entre ellos Imbrie y Michael Ghil, de la Universidad de Nueva York, abogan por la resonancia como explicación del ciclo climático de 100.000 años; han examinado modelos de ordenador que incorporan factores que podrían conferir al clima esta frecuencia propia. En opinión del autor, el modelo más razonable es uno que toma en cuenta la respuesta del lecho de rocas subyacente a las espesas capas de hielo. Tal lecho se hunde bajo una capa de hielo creciente, pero tarda algún tiempo en ajustarse al peso, miles de años por lo menos. En el entretanto, y a medida que la capa de



7. EN LA RESPUESTA RETARDADA del lecho rocoso se hallaría la razón de que el período dominante de la curva de volumen del hielo sea de 100.000 años; ello, aunque la insolación a altas latitudes quede menos afectada por la excentricidad (con un período de 100.000 años) que por los parámetros orbitales con períodos más cortos. Las gráficas muestran los volúmenes de hielo, predichos a partir de la insolación por un modelo de capas de hielo elaborado por David Pollard. En un experimento con el modelo (*arriba*) se supuso que el lecho rocoso se hundía inmediatamente bajo el peso del hielo acumulado. En otro experimento (*gráfica inferior*) se imaginó que el lecho rocoso necesitaba unos 10.000 años para ajustarse al peso, manteniendo la superficie de la capa de hielo a mayor altura y a temperatura más baja. El segundo experimento se acerca más a los máximos de la curva del registro isotópico (*color*).

hielo se espesa, su superficie alcanza alturas cada vez mayores, donde hay mayor probabilidad de nevadas. El hielo se acumula entonces más deprisa todavía. Cuando termina por desplomarse el lecho rocoso, se hunde con él la capa de hielo, lo que favorece la fusión de la misma. Así, la respuesta del lecho rocoso puede robustecer la tendencia hacia el crecimiento de las capas de hielo para después favorecer el proceso opuesto de fusión. Iniciada la cual, el lecho rocoso asciende lentamente ante el aligeramiento de la carga, elevando la capa de hielo remanente y determinando que el ciclo vuelva a empezar.

El efecto que podría ejercer la carga sobre los lechos rocosos en el volumen global de hielo se puso de manifiesto en un modelo de capas de hielo elaborado por David Pollard, de la Universidad del estado de Oregón. Suponía en un principio que el crecimiento del hielo sería inversamente proporcional a la insolación; sin tener en cuenta la respuesta del lecho rocoso, el modelo predecía volúmenes de hielo dominados por los ciclos de 40.000 años de la inclinación y de 20.000 de la precesión. Cuando se incluía la respuesta del lecho rocoso y se admitía que éste reaccionaba a la carga y descarga con un retraso aproximado de 10.000 años, el modelo predecía cambios en el volumen de hielo dominados por el ciclo de 100.000 años. En realidad, la respuesta del lecho rocoso a las capas de hielo resulta mucho más complicada que la simulación diseñada por Pollard. El problema no puede considerarse, pues, resuelto. Sin embargo, la carga sobre el lecho rocoso proporciona una explicación razonable de la frecuencia natural del clima.

Aunque parece clara la existencia de una relación entre la órbita de la Tierra y los períodos glaciales, conviene decir unas palabras cautelares. La impulsión orbital es uno más entre los muchos factores que podrían haber cambiado el clima. Las propias partículas inyectadas en la estratosfera por un gran número de erupciones volcánicas, por ejemplo, podrían absorber o difundir suficiente cantidad de energía solar y producir un notable enfriamiento global. A su favor tiene la teoría de Milankovitch que puede someterse a comprobación; los cambios en la órbita terrestre, y, por tanto, en la insolación, pueden calcularse fácilmente aplicando la ley de la gravitación universal de Newton a configuraciones progresivamente más antiguas de los cuerpos del sistema solar. Los climatólogos prefieren experimentar con funciones impulsoras bien definidas, tales como las variaciones orbitales, pero la falta de información acerca de otros posibles factores actuantes no significa que sean menos importantes.

En todo caso, la teoría de Milankovitch no explica por qué los períodos glaciales comenzaron a producirse en el Pleistoceno temprano. A lo largo de la mayor parte de la historia de la Tierra había poco o ningún hielo continental y el clima era apreciablemente más cálido que lo ha sido en el último millón de años. ¿Qué produjo el enfriamiento que desencadenó los períodos glaciales? Una respuesta puede estar en el movimiento de los continentes sobre la superficie terrestre. El clima pudo haber empezado a enfriarse cuando América del Norte y Eurasia alcanzaron sus actuales posiciones, hace unas decenas de millones de años, y comenzaron a establecerse nuevas pautas de transporte de calor oceánico y atmosférico. El proceso parece haber sido gradual. El hielo glacial se formó en la Antártida 30 millones de años atrás, tras separarse de América del Sur y de la circulación de las cálidas aguas ecuatoriales. Hay indicios de que los glaciares a altas latitudes comenzaron a formarse en el Mioceno.

¿Habrá más períodos glaciales en el futuro? Las fluctuaciones en el registro isotópico no dan señales de disminuir; mas, a pesar de lo cual, quizá haya atravesado el planeta su último período glacial, si atendemos a la acción ejercida por el hombre sobre el clima. A medida que progresa la industrialización y se quema más combustible fósil, aumenta la concentración de dióxido de carbono y otros gases atmosféricos escasos. Hacia finales de siglo, estos gases llegarán a producir, de continuar así, un calentamiento apreciable de la Tierra, un aumento de la temperatura media global suficientemente grande para superar cualquier enfriamiento instado por las variaciones orbitales.

La Tierra no es el único planeta cuyo clima puede quedar afectado por variaciones de su órbita y su inclinación axial. Marte tiene fluctuaciones orbitales mucho mayores porque está más próximo a un planeta ingente: Júpiter. La inclinación del eje de rotación de Marte varía entre 12 y 38 grados, con un período de unos 120.000 años. Las variaciones de insolación resultantes deben tener un importante efecto sobre el clima de Marte. Algunos de sus accidentes recientemente detectados (depósitos estratificados cerca de los polos) quizá conserven esos cambios.

Ciencia y sociedad

Chispas con quark

¿Por qué brilla el Sol? La respuesta inmediata a esta pregunta es que las reacciones termonucleares que se producen en su interior desprenden energía al producirse helio por la fusión del hidrógeno. Una explicación más completa debe describir el desarrollo de las reacciones; la única prueba directa que tenemos de las mismas es el flujo de neutrinos que se desprenden en los pasos intermedios del proceso. En principio, este flujo puede detectarse en la Tierra, ya que los neutrinos no suelen reaccionar con la materia, y, por tanto, atraviesan las capas exteriores del Sol sin mayores contratiempos. En 1967, Raymon Davis, Jr., del Brookhaven National Laboratory, midió el flujo de neutrinos al pie de la mina de oro de Homestake, en Dakota del Sur; los resultados no concordaban con la teoría, ya que el flujo medio era cuatro veces menor que el esperado. Cuatro físicos de la Universidad estatal de Ohio han propuesto un nuevo desarrollo de la nucleosíntesis del helio que puede resolver la discrepancia. Richard N. Boyd, Ronald E. Turner, Michael C. T. Wiescher y Lawrence J. Rybarcyk proponen la presencia, cerca del centro del Sol, de núcleos atómicos exóticos, cuya carga eléctrica es fraccionaria y no múltiplo entero de la carga del electrón. Su trabajo ha aparecido en *Physical Review Letters*.

Si es que existen, las partículas de carga fraccionaria deben ser muy raras en la naturaleza; la idea de que toda carga eléctrica es entera se acepta como una de las propiedades fundamentales de la materia desde que Robert A. Millikan midió, a principios de siglo, debilísimas cargas eléctricas. Sin embargo, según la teoría de la cromodinámica cuántica, QCD (Quantum ChromoDynamics), toda la materia nuclear está compuesta de quarks, que portan carga eléctrica de un 2/3 o 1/3 de la carga del electrón. En la mayoría de las interpretaciones de la teoría de la QCD, no pueden existir aislados los quarks; los quarks se unen para formar partículas de carga entera. El protón, por ejemplo, consta de dos quarks "arriba" (*up*), con una carga de 2/3 cada uno, y un quark "abajo" (*down*), con una carga de $-1/3$; la carga neta es 1. La existencia de estados ligados de quarks cuya carga neta no sea entera no puede explicarse por la QCD; sin embargo, puede haberse descubierto tales partículas. En 1981, William M. Fairbank, George S. LaRue y James D. Phillips, de la Universidad de Stanford, informaron de la detección de pequeñas concentraciones de partículas de carga fraccionaria en el metal niobio. Si bien el descubrimiento de Stanford no se ha repetido, la sensibilidad de los experimentos es tan alta que los resultados no pueden desecharse.

Los teóricos de la estatal de Ohio sugirieron que los núcleos de carga no entera en el Sol podrían catalizar un ciclo de la nucleosíntesis del helio de cuya existencia no se conozca todavía nada. Hasta ahora se han propuesto dos procesos de reacción principales que producen la energía solar. El dominante empieza con la fusión de dos protones para formar un núcleo de deuterio; la reacción se llama reacción protón-protón. El resultado es la emisión de un neutrino, pero la energía media de tales neutrinos es demasiado baja para que el aparato de Davis logre detectarla. Los siguientes pasos de la reacción, no obstante, liberan neutrinos de energía mucho mayor; fundamentalmente, son esos neutrinos los que pueden observarse. De acuerdo con el modelo teórico estándar, el desarrollo de esta reacción protón-protón explica un 98 por ciento de la nucleosíntesis del helio en el Sol y el 98 por ciento de la energía solar.

El segundo mecanismo importante es el ciclo CNO (carbono-nitrógeno-oxígeno), propuesto en 1939 por Hans A. Bethe, de la Universidad de Cornell, e, independientemente, por C. F. von Weizsäcker, de Alemania. En este proceso, los núcleos de carbono 12 del interior del Sol se combinan con tres protones, de uno en uno, para formar núcleos cada vez más pesados. Acreción de protones que progresa hasta resultar un núcleo de nitrógeno 15, que consta de siete protones y ocho neutrones. (Dos de los protones agregados se desintegran en neutrones; por cada desintegración se emite un neutrino difícilmente detectable.) Con la adición de un cuarto protón, el núcleo en crecimiento se divide en un núcleo de helio y un núcleo de carbono 12, reemprendiéndose entonces el ciclo. En el modelo estándar de la combustión solar, este ciclo CNO explica el dos por ciento restante del rendimiento de la energía solar.

El flujo de neutrinos de alta energía que puede medirse en la Tierra varía mucho para cambios relativamente pequeños de la temperatura a la que se desarrolla la reacción solar. Los investigadores de la estatal de Ohio se dieron cuenta de que una manera de conciliar el flujo de neutrinos observado con el predicho es la de suponer una temperatura menor para la región del Sol donde se emiten los neutrinos. Si la temperatura supuesta se reduce en un millón de grados Kelvin, de 14,4 a 13,4 millones de grados, la producción de neutrinos de energía suficiente para ser detectados decae en un factor de cuatro. No admitiendo ningún otro mecanismo de producción de helio, una temperatura semejante haría decrecer el rendimiento energético del Sol en un 22 por ciento. El mecanismo propuesto recientemente restituye la energía solar emitida a su valor observado, sin desprender neutrinos cuya energía, muy alta, permitiera detectarlos.

Los núcleos de carga fraccionaria desempeñan el mismo papel en la nueva reacción que el que realizaban los núcleos de carbono 12 en el ciclo CNO: catalizan la adición de protones libres. La reacción empieza con lo que se llama un núcleo quarkeado de helio, constituido por dos protones, dos neutrones y un quark "arriba"; la carga nuclear es de 2⅔. Se van añadiendo, de uno en uno, tres protones a este núcleo, hasta lograr una partícula de tres protones, cuatro neutrones y un quark "arriba". Esta partícula es, esencialmente, un núcleo de litio 7 combinado con un quark "arriba". La adición de un cuarto protón desdobla el núcleo quarkeado de litio 7 en un núcleo de helio y un núcleo quarkeado de helio; con este núcleo quarkeado, el ciclo vuelve a empezar. Como en los otros dos procesos, el cambio esencial que se produce es la fusión de cuatro protones en un núcleo de helio, con desprendimiento de energía y neutrinos. De

acuerdo con el grupo de la estatal de Ohio, la reacción puede desarrollarse de suerte tal que la energía de los neutrinos desprendidos sea demasiado baja como para que éstos puedan detectarse en la Tierra.

El último mecanismo propuesto puede generar el 22 por ciento de la energía del Sol perdida si los núcleos de carga fraccionaria forman una parte de cada 10^{15} partes del interior solar. La proporción es coherente con los límites de error cometidos por los experimentos de Stanford. No obstante, el modelo debe contemplarse con sumo cuidado. Los resultados de Stanford no gozan de una absoluta aceptación; una nucleosíntesis quarkeada sólo puede dar cuenta de los neutrinos que faltan si determinadas cantidades físicas, como la temperatura interna del Sol, caen dentro de límites muy estrechos. De acuerdo con William A. Fowler, del Instituto de Tecnología de California, las pruebas de cualquier teoría de la producción de energía solar habrán de aguardar la construcción de un detector de neutrinos más sensible. Se propuso un detector así, que consistía, esencialmente, en 50 toneladas del metal raro galio. El principal obstáculo para la construcción del aparato reside en la cantidad de metal necesaria (mayor que la producción anual del mismo) y su elevado coste: más de 25 millones de dólares. (V. G.)

Taube y la transferencia electrónica

El premio Nobel de química 1983 ha sido otorgado a Henry Taube, profesor de la Universidad de Stanford. Esta noticia ha sido recibida con gran satisfacción especialmente por quienes nos ocupamos del estudio de los procesos denominados de transferencia electrónica.

Henry Taube nació en 1915 en la ciudad de Neudorf (Saskatchewan, Canadá), nacionalizándose ciudadano estadounidense en 1942. Cursó los estudios de química en la Universidad de Saskatchewan, que finalizó en 1940, pasando luego, sucesivamente, a las universidades de California (Berkeley, 1940-1941), Cornell (1941-1946), Chicago (1946-1961) y finalmente Stanford (desde 1962). Ha publicado cerca de trescientos artículos científicos, investigando actualmente sobre "aquoiones", la química del nitrógeno como ligando, las transferencias de carga en iones metálicos, las moléculas de valencia mixta, el mecanismo de transferencia de átomos y electrones, la catálisis electródica y otras importantes cuestiones de la química. Entre sus numerosos galardones recibidos anteriormente destacan el premio "Linus Pauling" 1981 y el premio de la Fundación "Robert A. Welch" 1983.

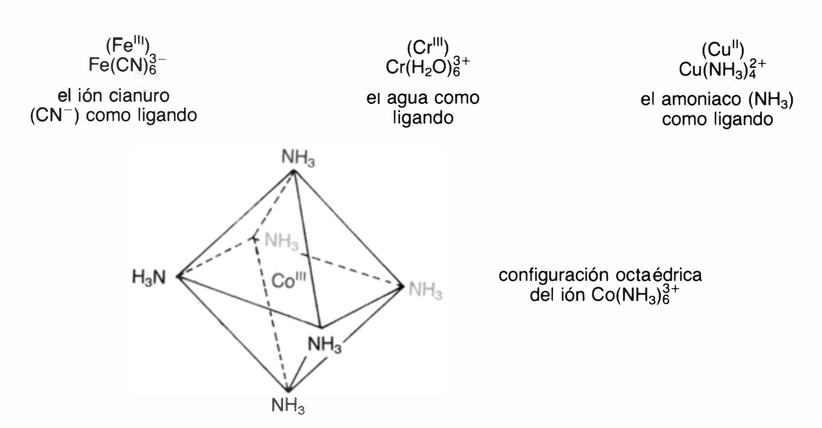
Merced a los grandes progresos realizados durante los últimos cincuenta años en la comprensión del papel de los electrones en química, especialmente en química física y en química orgánica, se ha alcanzado un elevado grado de unificación entre éstas y otras disciplinas, o divisiones clásicas de la química, llenando las zonas de penumbra entre ellas. En tales avances ha sido decisiva tanto la adopción revolucionaria de la física cuántica [veáse *Investigación y Ciencia*, abril de 1982, págs. 38-41], como instrumento de progreso, cuanto la búsqueda de nuevos resultados experimentales. El aporte de Taube se centra precisamente en las zonas intermedias con la química inorgánica, estableciendo nexos esenciales y con ello causando un enriquecimiento de la química en general, y en particular de la propia química inorgánica, que hasta hace relativamente poco parecía la "hermana pobre" de la química orgánica, convertida en una disciplina estancada, sin

A• + B → A + B•
dador aceptor

>C•—R—C•< + >C+—R—C+< → >C•—R—C+< + >C•—R—C+<

• electrón
+ carga eléctrica positiva

*1. Esquema general de una transferencia electrónica (***arriba***) y ejemplo en la química orgánica (***abajo***)*



2. Varios ejemplos de complejos de Werner. Los números romanos indican el estado de oxidación del metal.

$$Co^{III}(NH_3)_5X + Cr^{II}(H_2O)_6 \rightarrow Co^{II}(NH_3)_5(H_2O) + Cr^{III}(H_2O)_5X$$

3. Transferencia electrónica e intercambio de ligandos entre iones complejos

$(NH_3)_5\,Ru^{II}$-N(pirazina)N-$Ru^{III}\,(NH_3)_5$ ⇌ $(NH_3)_5\,Ru^{III}$-N(pirazina)N-$Ru^{II}\,(NH_3)_5$

N⬡N = pirazina

NH_3 = amoniaco

4. Un notable complejo de Creutz-Taube

un futuro esperanzador. Sin embargo, gracias a la labor de unos pocos científicos, entre los cuales Taube brilla con una luz especial, se ha logrado que esta química haya recuperado su elevado rango de antaño.

Posiblemente uno de los procesos químicos cuyo estudio ha dado a Taube mayor renombre sea la transferencia electrónica entre iones metálicos complejos. Para explicarlos, recordemos brevemente la naturaleza del electrón. Este es una partícula cargada negativamente que puede ser libre, como en los rayos *beta*, o bien ligada a núcleos atómicos, con carga eléctrica positiva. Las moléculas, formadas por conjuntos de átomos con sus electrones, pueden ser eléctricamente neutras o bien cargadas, sea positivamente (cationes) o negativamente (aniones). Los metales tienden a formar cationes; por ejemplo, el hierro, con dos o tres cargas positivas por átomo. Los electrones pueden "saltar" de una molécula (molécula dadora) a otra (molécula aceptora); a este proceso se le denomina de transferencia electrónica. Las moléculas resultantes poseen, en consecuencia, un número inferior y superior de electrones, respectivamente, al de aquellas de las cuales se originan.

Por cada electrón transferido se crea una carga eléctrica positiva adicional (o desaparece una carga negativa) en la molécula dadora, y una carga negativa adicional (o una carga positiva menos) en la molécula aceptora.

Taube ha contribuido decisivamente a la averiguación de los mecanismos implicados en la química de los complejos de coordinación de los metales, los llamados "complejos de Werner" en virtud de los estudios pioneros de Alfredo Werner, premio Nobel de química 1913. Tales complejos están constituidos por un átomo de un metal unido o "coordinado" a un cierto número de moléculas neutras o cargadas eléctricamente llamadas "ligandos".

Los ligandos se encuentran dispuestos en el espacio alrededor de los átomos del metal según un orden llamado "configuración". Por ejemplo, en el ion $Cu(NH_3)_4^{2+}$ los ligandos NH_3 (amoníaco) se sitúan en los vértices de un tetraedro, y en el ion $Co(NH_3)_6^{3+}$, en los de un octaedro.

Las reacciones entre iones complejos han sido estudiadas experimentalmente por Taube, particularmente en sus mecanismos de reacción, estableciendo valiosas correlaciones entre la estructura electrónica de los iones y la cinética (velocidad de reacción) del proceso de sustitución de ligandos [*J. Chem. Phys.*, **18**, 757 (1950); *Chem. Revs.* **50**, 69 (1952)] y de transferencia electrónica [*J. Am. Chem. Soc.*, **76**, 2103 (1954); *ibid*, **88**, 4295 (1966); *Pure Appl. Chem.*, **24**, 289 (1970); *Advances in Chem. Ser.*, **162**, 127 (1977)].

Una de las más notables contribuciones a la química de los iones complejos es indudablemente la síntesis y estudio de los llamados complejos de Creutz-Taube [*J. Am. Chem. Soc.*, **93**, 1086 (1973)], que poseen dos átomos de metal, concretamente de rutenio, unidos por un ligando común (pirazina). Los estados de oxidación de los dos átomos de rutenio pueden ser los mismos (II, II o III, III) o bien diferentes (II, III). En el complejo $[II, III]^{5+}$ existe una transferencia interna y oscilante de un electrón entre los dos átomos de rutenio (deslocalización) que, según la técnica de observación empleada (escala de tiempo), hace que estos dos átomos de metal aparezcan como equivalentes –o sea, con el mismo grado de oxidación, entre II y III (grado 2,5)– o, por el contrario, diferentes [*J. Am. Chem. Soc.*, **95**, 1086 (1973); *Ann. New York Acad. Sci.*, **313**, 481 (1978); *Inorg. Chem.*, **20**, 3124 (1981)].

Los complejos de Creutz-Taube están contribuyendo brillantemente a la mejor comprensión de las transferencias electrónicas entre complejos de coordinación y, en particular, de las reacciones de reducción-oxidación (redox) enzimáticas implicadas en ciertos procesos de transferencia energética en el seno de las células vivas. (Manuel Ballester.)

La fecha de la Crucifixión

No deja de ser curioso que no conozcamos la fecha exacta de un acontecimiento de tanta trascendencia histórica como el nacimiento de Cristo. Desde luego, podría darse la respuesta de que tal fecha es precisamente el comienzo de la era cristiana y ha de ser, por tanto, el inicio del primer día del primer mes del primer año de la serie que nosotros utilizamos actualmente. Pero su aparente sencillez se desvanece si tenemos en cuenta que hasta el siglo VI no empieza a hablarse de este modo de contar el tiempo, concretamente por Dionisio el Exiguo, quien, por razones desconocidas, fijó el nacimiento de Cristo en el 25 de diciembre del año 753 de la fundación de Roma. Hacia el año 1000 está escala temporal estaba bastante difundida en Europa.

La fijación de fechas se realiza por medio del calendario, que es un sistema de cómputo de tiempo aplicable a períodos dilatados mediante la agrupación de los días en unidades superiores (años, meses, semanas, lunaciones, etc.).

A lo largo de su historia, los diferentes grupos humanos han usado, y siguen usando, calendarios diferentes, si bien el más extendido actualmente es el calendario gregoriano, que utiliza un año de 365 días, intercalando cada cuatro años uno de 366 días (año bisiesto), salvo en los años cuya cifra no sea divisible por 400.

Cuando se intenta establecer la fecha de acontecimientos muy separados en el tiempo, la utilización del calendario ha de hacerse con cuidado. Por ejemplo, nuestro propio calendario gregoriano data de 1582 y al implantarse llevó consigo la omisión de 10 días del cómputo que hasta entonces venía usándose, el llamado calendario juliano, establecido por Julio César el año 46 antes de Cristo, y cuya aplicación concreta fue bastante irregular, sobre todo en sus inicios, precisamente alrededor del nacimiento de Cristo.

No ha de sorprender, pues, que establecer la fecha exacta de otro acontecimiento memorable, la crucifixión de Cristo, presente grandes dificultades. Los evangelistas no mostraron excesivas preocupaciones cronológicas y no proporcionan indicaciones del año (según el calendario judío o el romano) en que sucedieron los hechos que narran. Incluso en términos relativos, parece haber una discrepancia de un día sobre la fecha de la última cena entre San Juan y los sinópticos. Por ello se hace preciso acudir a datos indirectos, lo que ha originado gran variedad de opiniones, sin que haya acuerdo entre los autores sobre el año ni el día. C. J. Humphreys y W. G. Waddington han atacado de nuevo el problema teniendo en cuenta un dato astronómico hasta ahora no considerado y que permitiría resolver la cuestión, según informan en *Nature*.

La coincidencia entre los cuatro Evangelios y los *Annales* de Tácito asegura que la crucifixión tuvo lugar mientras Poncio Pilato fue procurador de Judea, es decir, entre los años 26 y 36 d. C. Los cuatro Evangelios coinciden en que Jesús murió algunas horas antes del comienzo del sábado judío (el anochecer del viernes) y que era el tiempo de la Pascua judía (con la discrepancia ya indicada de un día).

La Pascua judía se celebraba el 15 del mes de Nisan, coincidiendo con la primera luna llena posterior al equinoccio de primavera. Por tanto, el día de la crucifixión sería el 14 o el 16 de Nisan

de un año comprendido entre 26 y 36 d. C. Sin embargo, el calendario judío en esa época no era regular, ya que el comienzo de cada mes se fijaba atendiendo a la primera observación de la Luna en cuarto creciente; era, por tanto, muy empírico, de modo que no es posible establecer ninguna correlación segura entre sus fechas y las del calendario romano.

Un cálculo de la visibilidad de la Luna en Israel realizado con técnicas actuales permite deducir los años en los que el 14 de Nisan fuese viernes entre los años 26 y 36. Los más probables, teniendo en cuenta todos los factores implicados, son el año 30 y el 33. En consecuencia, hay autores que fijan la fecha de la crucifixión el 7 de abril del año 30 y otros en el 3 de abril del 33.

Humphreys y Waddington creen poder resolver el dilema acudiendo a otro cálculo astronómico que se basa en alusiones documentales. En la Biblia y en otros textos se habla de "maravillas en los cielos" y de que "el Sol se oscurecerá y la Luna se volverá de color sangre". Todo esto hace pensar naturalmente en los eclipses. En algunas traducciones del Evangelio de Lucas se llega a decir que el Sol se eclipsó. Naturalmente, un eclipse de Sol es imposible cuando hay Luna llena y las referencias a un oscurecimiento del Sol el día de la crucifixión hay que entenderlas causadas por una tormenta de polvo. Pero, en cambio, es en este preciso intervalo de tiempo cuando se producen los eclipses de Luna. En circunstancias favorables, la Tierra se interpone entre la Luna y el Sol y proyecta su sombra sobre ella. Sin embargo, como es bien sabido y fácil de observar, la Luna no permanece completamente oscura durante los eclipses, sino que presenta una débil iluminación rojiza a causa de la luz solar que le llega después de refractarse en la atmósfera terrestre. Hay muchos documentos históricos que describen los eclipses de Luna diciendo que ésta "se volvió de color sangre".

Un cálculo de los eclipses de Luna visibles en Jerusalén entre los años 26 y 36, que fueron doce, demuestra que sólo uno de ellos se produjo en el tiempo de Pascua. Fue un eclipse parcial, del que en Jerusalén sólo pudieron verse sus últimos treinta minutos, cuando la Luna apareció en el horizonte hacia las 6,20 horas de la tarde con un 20 por ciento aproximadamente de su disco eclipsado. Acababa el día 14 de Nisan, que el calendario juliano designa como viernes 3 de abril del año 33 d. C., y se iniciaba la Pascua judía.

Proteínas de membrana

Firmemente implantadas en lípidos, se extienden hasta el medio acuoso. Nuevas técnicas microscópicas revelan las configuraciones que les permiten mantenerse en contacto con uno y otro ambiente

Nigel Unwin y Richard Henderson

Una película finísima, de gran estabilidad, compuesta de moléculas de lípidos y proteínas, rodea las células y envuelve los orgánulos incluidos en ellas: la membrana biológica. Cual barrera de permeabilidad, establece compartimentos discretos y evita que se mezcle al azar el contenido de un compartimento con el de otro, permitiendo a la química de la vida su ordenado proceder. Las membranas biológicas no constituyen, sin embargo, simples recipientes contenedores; sirven de mediadores altamente específicos entre la célula u orgánulo y su entorno. Que células y orgánulos diferentes ejerzan funciones distintas débese, en gran parte, al diseño peculiar de sus membranas y a las propiedades de las proteínas que las caracterizan.

Las proteínas de membrana presentan un amplio abanico de funciones vitales. La permeabilidad, altamente selectiva, se explica porque ciertas proteínas forman canales o bombas que franquean el paso, a través de la membrana, a iones o moléculas específicas, o los conducen por la misma en contra de un gradiente de concentración. La respuesta de una célula diana a hormonas, neurotransmisores o a antígenos foráneos depende de una proteína receptora que detecte la presencia de esas moléculas y transmita sus señales específicas a través de la membrana. Otras proteínas, enzimas o antígenos, por ejemplo, se encuentran ancladas en la membrana con el único fin de localizar allí una determinada reacción.

Lípidos y proteínas

Para comprender las decisivas misiones que desempeñan las proteínas de membrana es preciso conocer su estructura tridimensional y la alteración que ésta sufre ante estímulos específicos. En nuestro análisis de la estructura de las proteínas de membrana nos hemos ayudado de la microscopía electrónica.

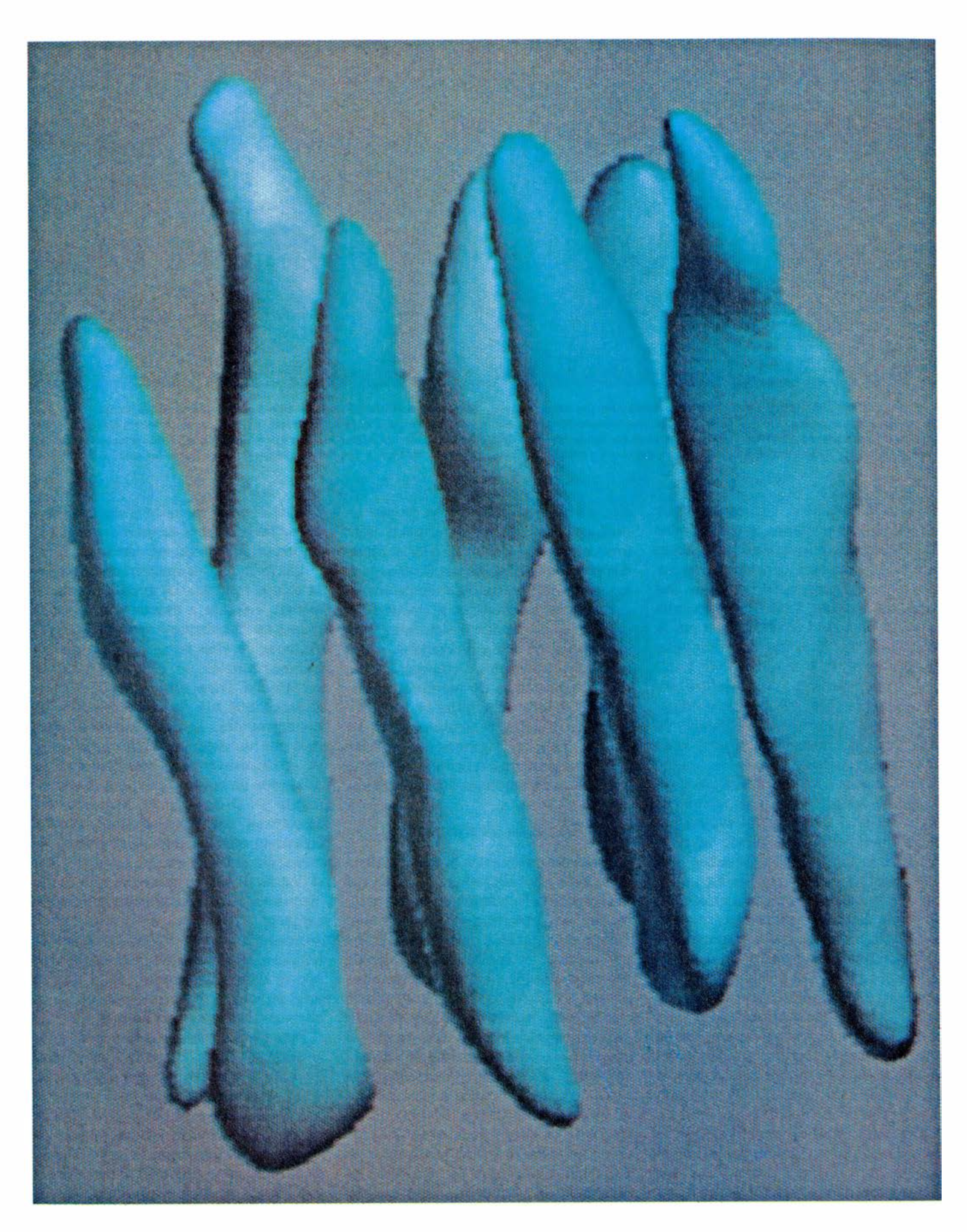
Toda membrana biológica consta de una doble capa de moléculas lipídicas, que se distinguen por su carácter anfipático, es decir, presentan una porción hidrofílica y otra hidrofóbica. La cabeza, voluminosa, de una molécula lipídica es hidrofílica, reacciona fácilmente con el agua, por lo común mediante la formación de enlaces de hidrógeno. Las dos largas colas hidrocarbonadas de la molécula son hidrofóbicas: no pueden formar enlaces de hidrógeno con el agua y la evitan. En un medio fisiológico acuoso tales moléculas tienden a disponerse en una membrana de dos capas. Las cabezas hidrofílicas se alinean mirando al exterior, interactuando con las moléculas de agua del espacio intercelular, el citoplasma de una célula o el interior de un orgánulo; las colas hidrofóbicas se alinean alejándose del agua, interactuando entre sí en el interior de la bicapa. Se forma así una membrana con un grosor de 4,5 nanómetros. Las moléculas lipídicas suelen hallarse en movimiento térmico, y tienen libertad para difundirse por el plano de la membrana; la bicapa constituye, en realidad, una película bidimensional de un líquido ligeramente más viscoso que el agua. A pesar de su escaso grosor y fluidez, la bicapa es estable, ya que las moléculas anfipáticas de lípido se encuentran en su orientación más favorecida.

De tres maneras se disponen las proteínas en la membrana: densamente intercaladas entre las moléculas de lípidos, dispersas por la membrana o formando agregados. Se distinguen las proteínas de membrana de las restantes hidrosolubles en que se encuentran en contacto con dos ambientes, es decir, están repartidas entre dos fases: la película lipídica donde se implantan y el medio acuoso por el que se extienden, frecuentemente a ambos lados de la membrana. Aunque gocen de libertad para difundirse en el plano de la membrana, quedan amarradas con firmeza en virtud de su carácter anfipático: poseen partes hidrofílicas, que interactúan con las cabezas lipídicas de la superficie de la membrana y con agua, y partes hidrófobas, que lo hacen con las colas lipídicas del interior de la membrana. Las proteínas de membrana pueden interactuar también con proteínas hidrosolubles, con otras también de membrana y con pequeñas moléculas solubles en lípidos.

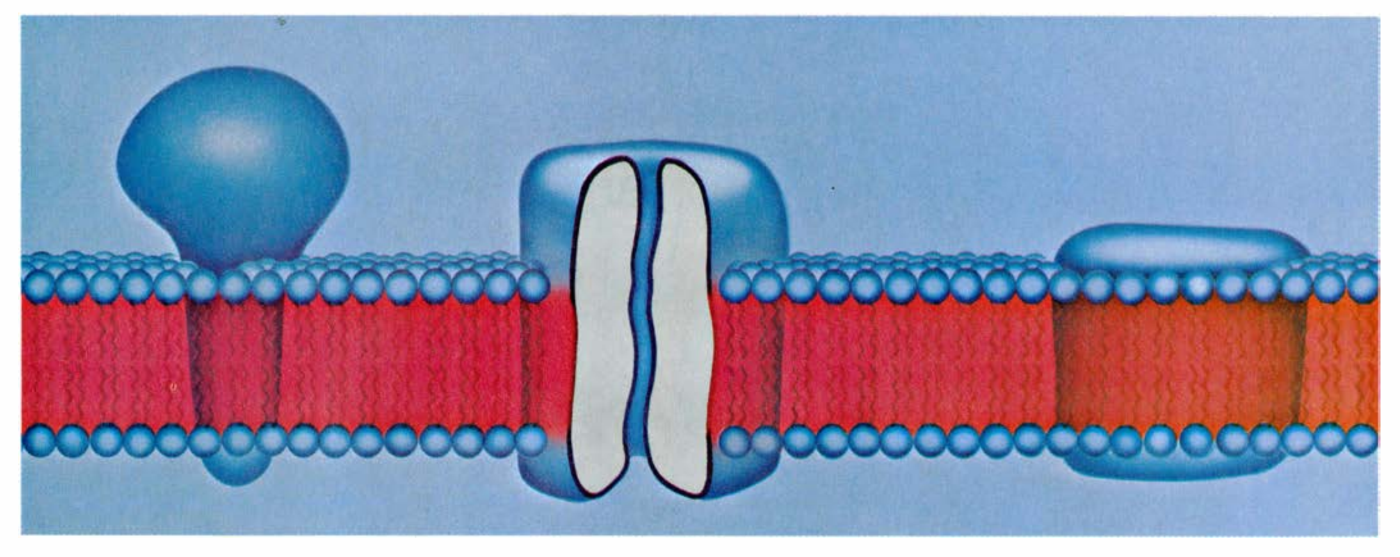
Los datos de que disponíamos nos llevaron a sospechar que el ambiente particular de la bicapa lipídica habría de imponer restricciones especiales a la estructura de las proteínas implantadas, y que también aquí debían valer los principios fundamentales de la estructura de las proteínas. Los aminoácidos, constituyentes de las proteínas, se engarzan en una secuencia lineal mediante enlaces peptídicos, formando una larga cadena polipeptídica. Las cadenas de proteína se pliegan sobre sí mismas (o se pliegan varias cadenas juntas), según especifique su secuencia de aminoácidos. La razón por la que la secuencia determina el plegamiento estriba en que las cadenas laterales que caracterizan a cada uno de los 20 aminoácidos difieren en tamaño, forma, carga, capacidad de establecer enlaces de hidrógeno y reactividad química; la evolución ha seleccionado las secuencias que producen estructuras estables y funcionales.

Hélice alfa, hoja beta

La mayoría de las proteínas hidrosolubles estudiadas hasta la fecha presentan segmentos donde la conformación del polipéptido es más o menos regular (en hélice alfa u hoja beta), conectados por regiones menos regulares. La estructura de la hélice alfa semeja un bastoncillo: la cadena principal se pliega helicoidal y ceñidamente, formando un bastón, del que se proyectan las cadenas laterales de los aminoáci-



1. ESTRUCTURA DE LA BACTERIORRODOPSINA, una proteína que abastece de energía una forma poco corriente de fotosíntesis en la membrana de bacterias halófilas, según una representación por ordenador generada por uno de los autores (Henderson) y Arthur M. Lesk. La proteína consta de 248 aminoácidos, empalmados en una sola cadena polipeptídica, que está ligada a un grupo retinal, que absorbe luz. Siete segmentos de la cadena, que abarcan la mayor parte de su extensión, se pliegan en la conformación regular de hélice alfa; se trata de los siete bastoncillos que recoge la ilustración. Probablemente las hélices estén unidas entre sí por seis segmentos no helicoidales de la cadena, pero ni esos segmentos ni el retinal se distinguen en una resolución de 0,7 nanómetros, que es la de los mapas de densidad electrónica a partir de los cuales se ha confeccionado esta representación (*véase la figura 9*).



2. TODA MEMBRANA BIOLOGICA está constituida por proteínas, insertas en una película de dos capas de moléculas lipídicas estrechamente empaquetadas. Las cabezas hidrofílicas (*esferas azules*) de los lípidos se orientan hacia el medio acuoso extracelular o intracelular (*azul claro*) y sus colas hidrocarbonadas hidrofóbicas se orientan hacia el interior de la bicapa (*rojo*). Las porciones expuestas de las proteínas implantadas son también hidrofílicas (las no integradas en hélices α u hojas β) o hidrofóbicas, según interactúen con las cabezas lipídicas y con las moléculas de agua o con las colas hidrofóbicas.

dos. En la hoja beta, y casi totalmente extendidas, se disponen, paralelas, dos o más cadenas principales; las cadenas laterales de los aminoácidos se proyectan aquí en perpendicular a las dos caras de la hoja. Tanto la hélice alfa como la hoja beta se estabilizan por la formación de enlaces de hidrógeno entre los grupos hidrofílicos NH y CO de la cadena principal. En la hélice alfa estos enlaces se dan entre grupos situados en vueltas sucesivas de la hélice; en la hoja plegada ocurre entre grupos de hebras adyacentes.

Los enlaces estabilizadores quizá no lleguen a formarse en regiones menos regulares de la proteína (allí donde una cadena polipeptídica conecta entre sí dos hélices alfa sucesivas); quedan grupos hidrofílicos libres en la cadena principal, normalmente unidos a moléculas de agua. Sería inestable la estructura cuyos grupos hidrofílicos fueran incapaces de interactuar entre sí o con moléculas de agua. Las proteínas solubles alcanzan la estabilidad plegándose de suerte que las estructuras alfa y beta con enlaces internos se sitúen, en su mayoría, en el interior, quedando las vueltas y pliegues menos regulares en la superficie de la molécula, donde pueden establecer contacto con el agua.

Para una proteína implantada en el medio hidrofóbico de las colas lipídicas deben regir principios similares, quizás incluso con mayor rigor. Las vueltas y pliegues menos regulares, con grupos formadores de enlaces de hidrógeno en estado libre, deben hallarse principalmente en las porciones de la proteína expuestas a las cabezas hidrófilas de los lípidos o al medio acuoso. Las hélices alfa y las hojas beta, cuyos grupos hidrófilos de las cadenas principales están unidos entre sí, deben quedar confinadas en el interior de la membrana, en el medio hidrófobo de las cadenas hidrocarbonadas lipídicas, y lo mismo sucederá a las cadenas laterales más hidrófobas de los aminoácidos. Cabe imaginar múltiples configuraciones para las proteínas de membrana: manojos de hélices alfa, hojas beta organizadas en toneles o combinaciones de ambas. Tales configuraciones podrían constituir proteínas funcionales o subunidades de ensamblajes más complejos.

Análisis electrónicos

Para contrastar estas hipótesis iniciamos, hace unos diez años, el análisis al microscopio electrónico de la estructura de las proteínas de membrana. Adaptamos técnicas de cristalografía por rayos X al análisis de cristales de proteínas solubles. Un cristal está constituido por varias moléculas idénticas, ensambladas según posiciones y orientaciones que dependen con exactitud de la estructura de cada una de ellas; la estructura del cristal es, en efecto, la suma de las que presentan las unidades repetitivas. El registro del tipo de difracción que sufren los rayos X al incidir en los átomos del cristal nos informa de las posiciones que ocupan éstos en cada molécula del cristal. Por análisis de difracción de rayos X de grandes cristales tridimensionales se ha recabado la mayor parte de lo que sabemos sobre la estructura de las proteínas solubles, incluidos los detalles de las configuraciones alfa y beta. La imposibilidad de obtener cristales tridimensionales de las proteínas de membrana había impedido aplicarles ese análisis.

Las proteínas de membrana flotan en la bicapa lipídica, un mundo bidimensional. Tienden a asociarse más fácilmente en dos dimensiones que en tres. Algunas de ellas se agregan en mallas bidimensionales en el interior de la membrana. Otras formarán tales disposiciones, que son de hecho cristales bidimensionales, en cuanto las extraigamos con un detergente; se purifican y se reconstituyen con una proporción adecuada de lípido. Los rayos X difícilmente se difractarán al atravesar tan fino cristal, pero los electrones, que interactúan con los núcleos atómicos, se dispersan mucho más que los rayos X y sí dan un diagrama de difracción. A los electrones, que son además partículas cargadas, podemos enfocarlos para sacar una imagen: una micrografía electrónica. El diagrama de difracción aporta alguna información de la estructura de una molécula determinada; la micrografía ofrece mucho más.

Para someter la membrana a microscopía electrónica convencional hemos de teñirla negativamente: se embebe en la sal de un metal pesado, opaco al haz de electrones. El colorante resalta las superficies hidrófilas externas de la muestra, revelándonos la morfología de los rasgos superficiales; no se distingue, de las moléculas proteicas, la estructura interna de la bicapa lipídica. Para observarla, hay que eliminar el colorante y visualizar la muestra directamente, proceso que no resulta fácil, pues el haz electrónico daña rápidamente la materia biológica, al contrario

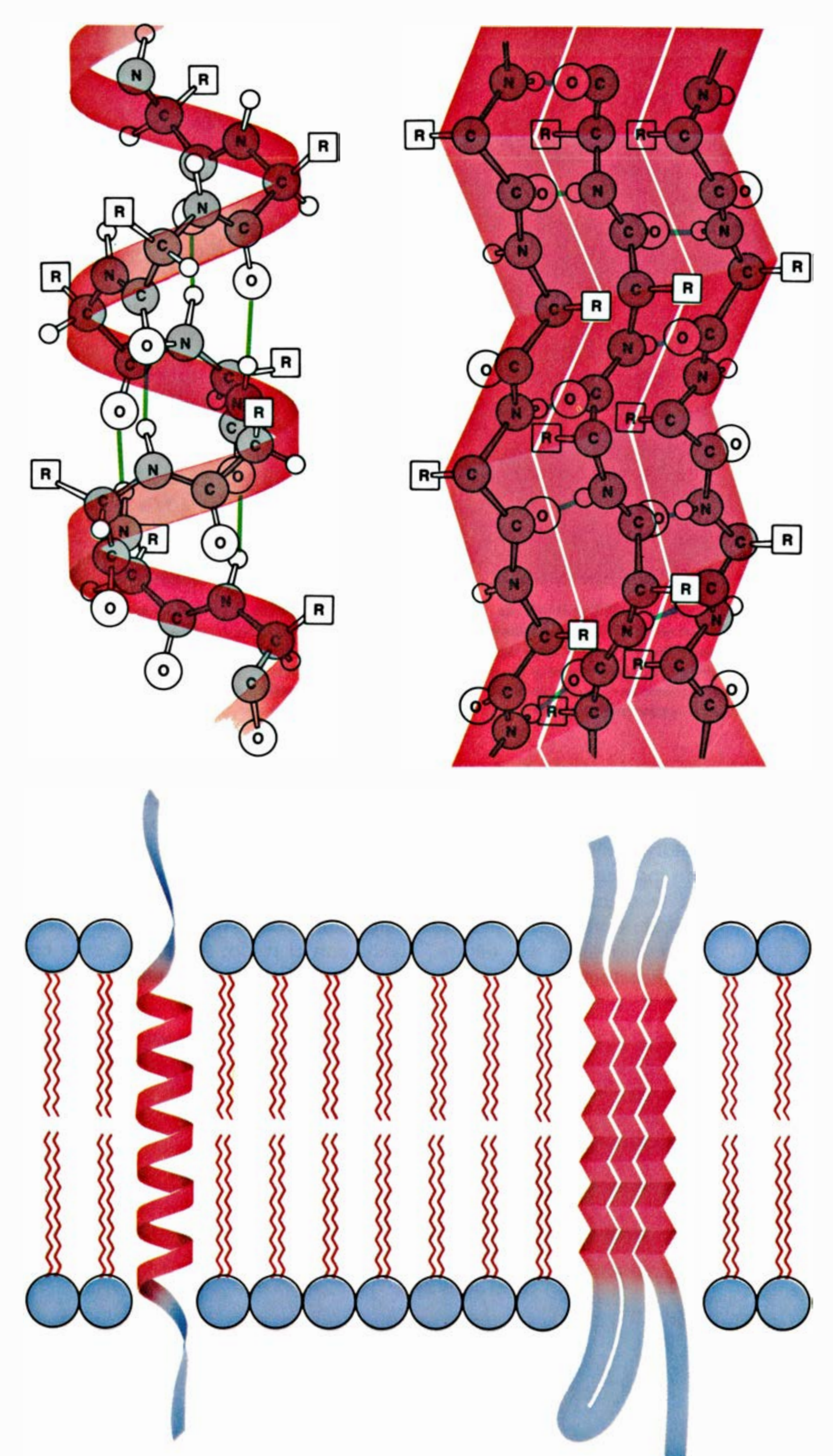
de lo que ocurre con el colorante. Las hélices alfa y las hojas beta se destruyen con una dosis electrónica mucho menor de la requerida para definir esas formas en una micrografía de una sola molécula.

Se obvia el problema obteniendo una sola micrografía de un cristal de varios millares de moléculas con una dosis electrónica muy débil, incapaz de destruirlas; se aplica luego un procedimiento de adición que refuerce los pormenores de la estructura repetitiva molecular al tiempo que suprima el enorme ruido enmascarante (los impactos electrónicos aleatorios asociados con la débil dosis electrónica). Así se construye una fotografía de la molécula a partir de fragmentos de información proporcionados por cada una de las unidades repetitivas.

Transformaciones de Fourier

Para llevar a cabo este refuerzo, o promediado, podría pensarse en tomar sucesivas unidades repetitivas de la micrografía y superponerlas entre sí, sumando la información que reflejara detalles propios, repetitivos. Mas la dificultad que suele acompañar a la determinación precisa de unidades repetitivas hace inviable ese procedimiento. Otro, más elegante y potente, lo desarrollaron, años atrás, David J. DeRosier y Aaron Klug, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigación Médica de Cambridge; lo aplicaron al análisis de micrografías electrónicas de agregados moleculares ordenados, en su caso partículas víricas. El promediado se realiza por etapas. En la primera se barre una micrografía de un objeto cristalino con un microdensitómetro, con lo que se genera una disposición bidimensional de números que representan la densidad fotográfica de cada punto de la imagen. En la segunda etapa, el ordenador calcula la transformación de Fourier de la disposición, que constituye, de hecho, el análogo numérico de su patrón de difracción. En la tercera, se selecciona, a partir de la transformación de Fourier, la información derivada de los rasgos del objeto que se muestran regulares y repetitivos. La etapa final reconstituye la imagen del objeto mediante la combinación de esta información en un segundo cálculo de transformación de Fourier: una síntesis de Fourier, que recrea la imagen original sin el ruido de fondo.

Excepto por lo que respecta a la tercera etapa, el proceso es enteramente análogo a la formación de una imagen



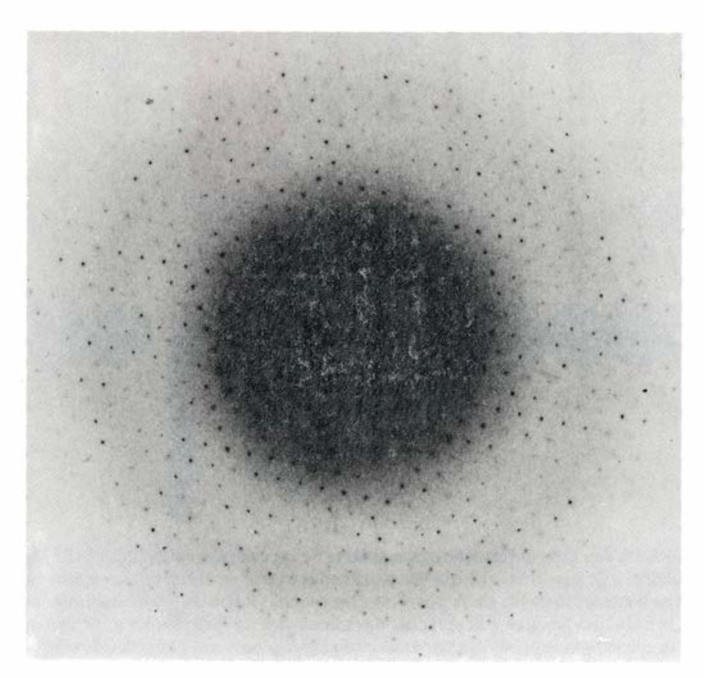
3. HELICE ALFA Y HOJA BETA son dos conformaciones regulares de las cadenas polipeptídicas de las proteínas. En la hélice alfa (*arriba, a la izquierda*) el esqueleto de la cadena (*gris*) se enrolla helicoidalmente, formando una estructura en bastoncillo de la que se proyectan las cadenas laterales (*R*) de los aminoácidos que la constituyen. En la hoja beta (*arriba, a la derecha*) dos o más cadenas principales se disponen en paralelo. En ambos casos la estructura se estabiliza por enlaces de hidrógeno (*verde*) establecidos entre grupos NH y CO de la cadena principal. Estos grupos son hidrofílicos: si no formaran enlaces entre ellos habrían de establecer enlaces de hidrógeno con moléculas de agua. Cabe esperar, por tanto, que las porciones de las proteínas de membrana que se hallan inmersas en la zona hidrofóbica interior de la membrana se encuentren, en su mayoría, en forma de hélices alfa u hojas beta (*abajo*); otras partes de la cadena menos regulares, cuyos grupos NH y CO pudieran no estar "protegidos" por enlaces entre ellos, habrían de disponerse en una superficie hidrofílica de la membrana o en el ambiente acuoso.



4. FORMACIONES CRISTALINAS de bacteriorrodopsina mostradas a 100.000 aumentos en una micrografía electrónica tomada por uno de los autores (Henderson) y David M. Shotton. Para obtener la micrografía se preparó un apilamiento de las membranas y se aplicó el método de criofractura y grabado, que requiere la congelación de la membrana, su escisión según un ángulo llano, un sombreado con platino y la obtención de una réplica en carbón. Las membranas que se tratan de esta forma tienden a escindirse por el plano central de la bicapa. La cara de fractura citoplasmática se distingue en la micrografía como regiones de textura rugosa. La superficie está tachonada de moléculas de bacteriorrodopsina en mallas hexagonales que se adhirieron a la capa interna al fracturarse las membranas. Las regiones lisas corresponden a la cara de fractura extracelular: la superficie fracturada de la capa externa.

en un microscopio simple de dos lentes. El primer objetivo crea un diagrama de difracción del objeto, equivalente a la primera transformación de Fourier; la segunda lente proyecta una imagen, equivalente a la segunda transformación, o síntesis, de Fourier. De hecho, a menudo inspeccionamos las micrografías con un difractómetro óptico que muestra su diagrama de difracción (la primera transformación) para comprobar su calidad antes de continuar con el proceso.

Para comprender la tercera etapa, que separa la información genuina asociada con detalles repetitivos de la asociada con el ruido, se han de tener en cuenta algunas propiedades de las transformaciones de Fourier. Se puede concebir una imagen como si estuviese compuesta de ondas sinusoidales de diversas longitudes de onda que difieren en su amplitud, orientación y desplazamiento a partir de un origen común. En la transformación de Fourier de la imagen cada sinusoide, o término de Fourier, aparece como dos picos agudos si-





5. POR MICROSCOPIA ELECTRONICA se obtiene tanto un diagrama de difracción como una imagen sin teñir de la disposición cristalina que forma la bacteriorrodopsina. Del análisis del diagrama de difracción (*izquierda*) se deduce la amplitud de los componentes sinusoidales de la estructura; su desplazamiento relativo sólo puede conocerse tras el estudio de la imagen que forman en una micrografía electrónica. La micrografía de una membrana sin teñir (*derecha*) no guarda semejanza alguna con la que se obtiene por criofractura, como la de la figura 4: la relación señal/ruido es tan baja que no se distinguen rasgos regulares. Para recabar información estructural de esa micrografía debe acudirse al análisis de Fourier. (Imágenes de los autores.)

tuados en posiciones simétricas a cada lado del origen, a una distancia del mismo que resulta inversamente proporcional a la longitud de onda; cada pico tiene una amplitud y una fase, que indican, respectivamente, la intensidad y el desplazamiento relativo de la onda. El patrón de picos de la transformación refleja, por tanto, la regularidad y simetría de la imagen.

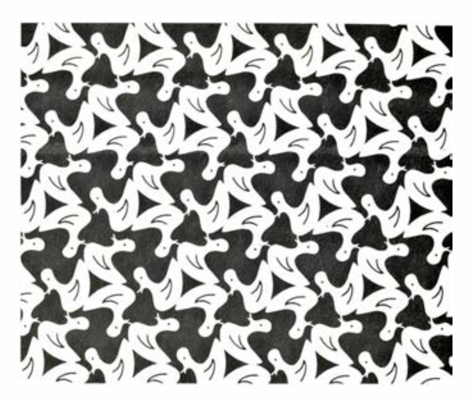
Al presentarse las densidades de los átomos que constituyen el cristal en una malla repetitiva, la primera transformación de Fourier muestra un patrón regular de fuertes picos, derivados de los componentes de las ondas sinusoidales que caen en la malla. Muestra también picos derivados del ruido; ahora bien, puesto que las fluctuaciones de densidad aleatorias del ruido contienen todos los componentes posibles de la onda sinusoidal, esos picos se presentan al azar por doquier. La primera transformación de Fourier consta, por tanto, de una malla de fuertes picos que sobresalen sobre un ruido de fondo. En la tercera fase, mediante un programa de ordenador, se seleccionan solamente los picos que forman un patrón regular y se enmascaran los picos interpuestos derivados del ruido. En la síntesis de Fourier que reconstruye la imagen se incluye sólo la información que refleja detalles genuinos. En la etapa final pueden también identificarse y sumarse únicamente los picos relacionados entre sí por la simetría del cristal, reforzándose con ello la imagen de la estructura real de la molécula.

La posibilidad de conocer la estructura de un agregado molecular, y hasta de una molécula aislada, mediante el análisis de una imagen obtenida con una dosis electrónica débil se aventuró antes de disponerse de la tecnología adecuada para llevar a cabo la tarea. Robert M. Glaeser, de la Universidad de California en Berkeley, realizó simulaciones por ordenador que demostraban las posibilidades del procedimiento. Su aplicación se hizo factible con el advenimiento de ordenadores suficientemente poderosos para calcular las grandes transformaciones de Fourier (cientos de miles de términos) en un tiempo razonable y con el desarrollo de métodos para mantener la integridad de muestras de membranas no teñidas en el vacío del microscopio electrónico. En este sentido, nuestro equipo descubrió una forma de proteger la muestra: sumergirla en una disolución de glucosa. Cuando se evaporaba el agua en el vacío, quedaba algo de glucosa líquida, que proporcionaba un medio hidrofílico sustitutivo del medio acuoso usual de la membrana. Otro procedimiento, desarrollado por Kenneth A. Taylor y Glaeser, en Berkeley, consistía en congelar la muestra en una película de agua o disolución de sal y examinarla a una temperatura suficientemente baja para que el hielo no sublimara.

Bacteriorrodopsina

La bacteriorrodopsina es una proteína simple que se encuentra en la membrana celular de las halobacterias. En el análisis de su estructura ensayamos la aplicación de estos desarrollos técnicos. Dichas bacterias sobreviven sólo en aguas con una concentración muy alta de cloruro sódico: lagos de elevada salinidad y embalses de evaporación. La proteína tiene una cadena de 248 aminoácidos ligada a un único grupo, llamado retinal; es este el elemento que absorbe luz en los pigmentos visuales animales, entre los que se cuenta la rodopsina, la "púrpura visual" de nuestros bastoncillos. En la membrana halobacteriana, la bacteriorrodopsina funciona a modo de bomba de protones impulsada por la luz, que suministra la energía necesaria para un tipo poco usual de fotosíntesis. La bacteriorrodopsina tiene la rara propiedad de agregarse en la membrana, formando acúmulos cristalinos compuestos de decenas de miles de moléculas proteicas y centenares de miles de moléculas lipídicas, empaquetadas en bloque en una malla hexagonal. No resulta difícil aislar los agregados e incluirlos en glucosa para su examen directo.

Nuestro plan consistió en registrar primero el diagrama de difracción electrónica de la ordenación cristalina y a continuación preparar imágenes del ordenamiento, para procesarlas mediante



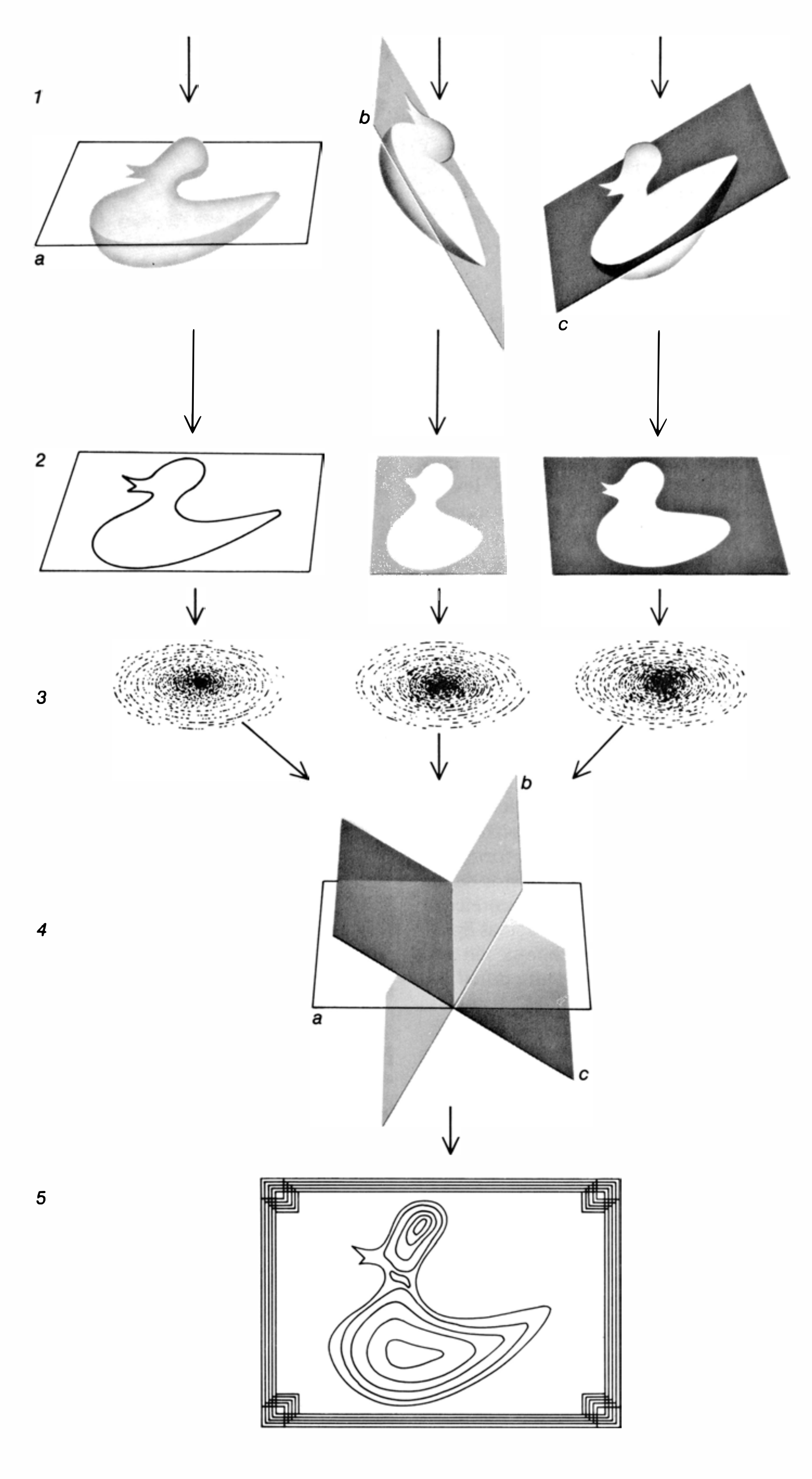








6. LA INFORMACION ESTRUCTURAL se separa del ruido de fondo aplicando el promediado de Fourier. Para ilustrar el procedimiento se ha superpuesto una trama de grano grueso a una malla regular de figuras de patos (*arriba*). Por fotografía se obtiene el símil de una micrografía electrónica con mucho ruido (*segunda desde arriba*). Se barre la fotografía con un densitómetro y se procesa el perfil de valores de densidad para obtener una transformación de Fourier, cuyo análogo visual corresponde a un difractograma (*centro*). La señal de las figuras de patos (*picos intensos sobre una malla regular*) se ha separado así del ruido (*picos al azar*); los dos tipos de información aparecían mezclados en la fotografía. Para generar una segunda transformación de Fourier (una síntesis de Fourier) se selecciona solamente la información de la señal y se obtiene de aquella una nueva imagen, en la que ha desaparecido el ruido y la pauta de patos destaca nítidamente (*penúltima figura*). Mediante el promediado de la información contenida en los picos relacionados por simetría de malla se genera un patrón aún más claro (*abajo*).



7. LA REPRESENTACION TRIDIMENSIONAL requiere un procesamiento posterior. Se inclinan las muestras diversos ángulos frente al haz incidente (*1*), de manera que las micrografías resultantes constituyan un conjunto de diferentes perspectivas de proyección (*2*). Se calculan las transformaciones de Fourier a partir de cada micrografía (*3*); cada una corresponderá a un plano diferente a través del origen de una transformación tridimensional de Fourier. La transformación tridimensional completa se obtiene de un gran número de estos planos; en la ilustración sólo se muestran tres (*4*). A partir de ella se trazan los mapas de nivel en hojas de plástico transparentes. Cada mapa corresponde a los valores de densidad de un nivel distinto de la membrana. Al apilar los mapas se revela la estructura tridimensional (*5*).

transformaciones de Fourier. Para registrar el diagrama de difracción basta con interrumpir la serie usual de operaciones que realiza un microscopio electrónico: se deja que los electrones desviados por los átomos lleguen directamente hasta una película fotográfica, sin necesidad de enfocarlos con la lente magnética del microscopio para formar una imagen. La membrana púrpura resultó tan sensible al daño por radiación que fue imposible seguir el procedimiento habitual de observar primero el diagrama de difracción en una pantalla fluorescente y grabarlo acto seguido; el diagrama de difracción se desvanecía ante nuestros ojos. Logramos evitar tal pre-irradiación y obtuvimos algunos diagramas de difracción hexagonales de suficiente claridad. Las intensidades de las manchas nos dieron las amplitudes de los términos de Fourier.

Para conocer la fase de las ondas sinusoidales, y por tanto su desplazamiento a partir de un origen común, preparamos una imagen real de la ordenación cristalina. Un agregado no teñido de membrana púrpura, registrado con una dosis baja de electrones, da una micrografía amorfa que desanimaría a cualquier microscopista. Sin embargo, si se observa una de esas micrografías a través de un difractómetro óptico se distingue un nítido diagrama de difracción cristalino: el detalle periódico débil extendido en el grabado por miles de unidades repetitivas se concentra en un número mucho menor de puntos definidos.

Se examinó con un microdensitómetro una extensión de micrografías suficiente para abarcar varios miles de moléculas de bacteriorrodopsina, y se combinaron las transformaciones de Fourier de los valores de densidad con las amplitudes derivadas de los patrones de difracción para sintetizar una representación promediada del ordenamiento cristalino: un mapa de curvas de nivel de las densidades atómicas que mostraba la estructura de la membrana púrpura en proyección (una perspectiva vertical en dos dimensiones). Las propiedades de formación de imágenes del microscopio limitaban la resolución del mapa a 0,7 nanómetros, es decir, resultaba difícil distinguir entre sí los rasgos separados por menos de esa distancia.

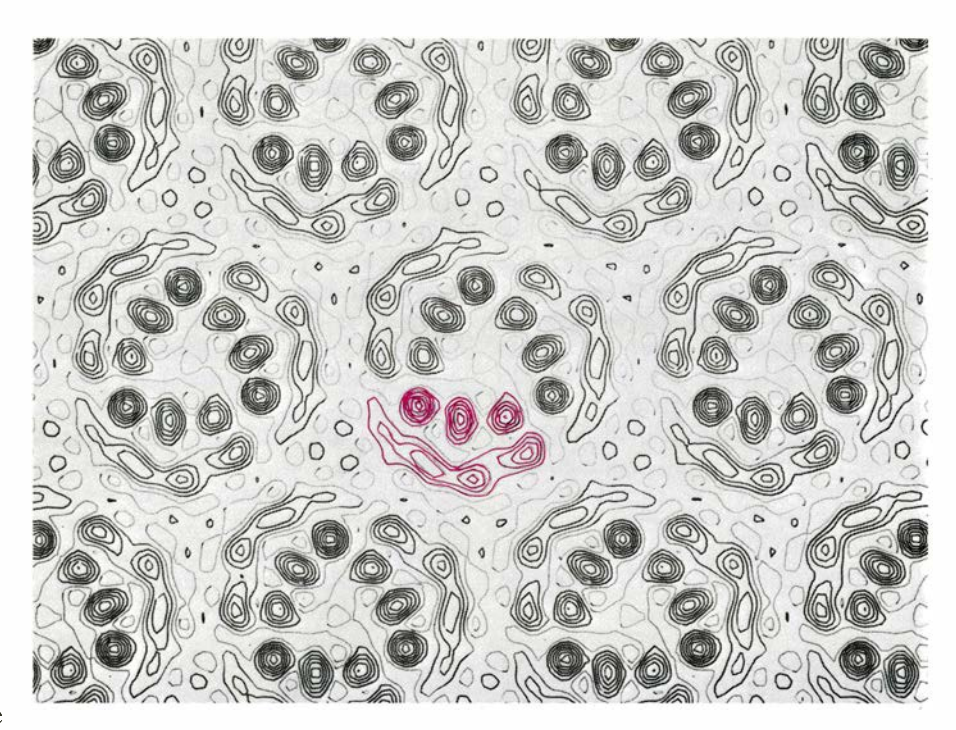
El mapa mostraba un sorprendente patrón de picos: el que generaría un juego de bastoncillos vistos desde sus extremos. De un pico a otro había un intervalo de 1,05 nanómetros. En otras proteínas, la aparición de esos patrones de bastoncillos en mapas de nivel a baja

resolución ha correspondido a la presencia de hélices alfa. Parecía como si el principal rasgo de la molécula de bacteriorrodopsina fuese un conjunto de hélices alfa dispuestas más o menos perpendicularmente a la bicapa lipídica. Precisamente uno de nosotros (Henderson) y Allen E. Blaurock, del King's College de Londres, habían postulado un empaquetamiento de la cadena peptídica en hélice alfa, fundados en el examen de diagramas de difracción de rayos X registrados a partir de comprimidos de membrana púrpura. Nos satisfizo la aparente confirmación, pero quedaban planteados algunos problemas. No podíamos valorar la profundidad a la que penetraban los bastoncillos en la bicapa, ni a qué fracción de la molécula correspondían, porque, además de los distintos picos, el mapa de proyección de cada molécula mostraba una banda continua de densidad difícilmente explicable. El análisis había de efectuarse en tres dimensiones.

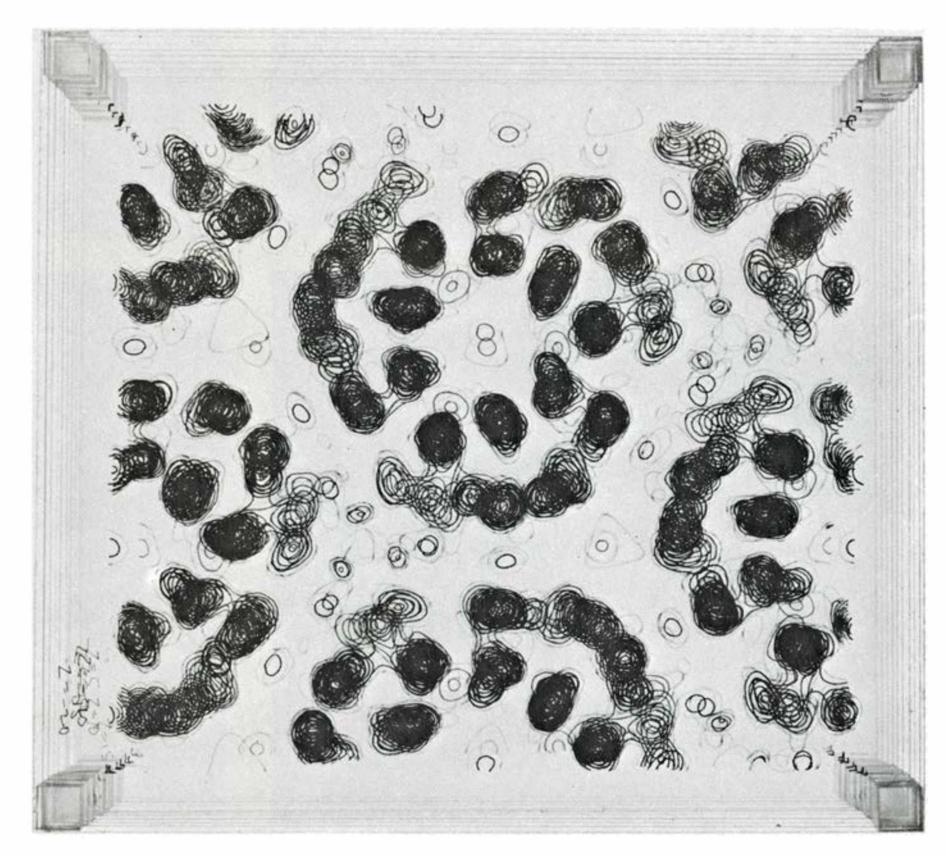
Estructura tridimensional

DeRosier y Klug habían formulado principios generales para resolver la estructura tridimensional de moléculas biológicas mediante la combinación de la información contenida en sucesivas perspectivas bidimensionales. En un estereomicroscopio cada ojo mira el espécimen desde un ángulo diferente de inclinación, y el cerebro combina las dos imágenes planas para crear una impresión tridimensional. Con un microscopio electrónico pueden registrarse también dos micrografías de un objeto con diferentes ángulos y contemplarlas luego a través de un visor estereoscópico, pero el procedimiento aporta pocos datos para una reconstrucción del objeto en tres dimensiones. La teoría de Fourier afirma, sin embargo, que tal reconstrucción será posible si en vez de dos perspectivas del objeto se registra una serie entera de perspectivas con ángulos ligeramente diferentes. Cada perspectiva da una proyección diferente del objeto, que se descompone entonces en su transformación de suerte que los términos de Fourier de la señal puedan separarse del ruido. Los términos de todas las proyecciones se combinan para así construir un conjunto completo tridimensional de términos, a partir del cual se elabora una representación tridimensional del objeto.

Para obtener una representación tridimensional perfecta debían tomarse micrografías electrónicas de la membrana púrpura con ángulos de inclinación que fuesen de cero a 90 grados.



8. MAPA DE NIVEL BIDIMENSIONAL obtenido mediante promedios de Fourier. Se aprecia, en proyección, la disposición cristalina de la bacteriorrodopsina y las moléculas lipídicas. Se ha delimitado en color un ejemplar de molécula proteica. Los contornos conectan puntos de igual densidad electrónica; puesto que los valores proceden de una única perspectiva (superior) de la muestra, se suman los valores de densidad de cada nivel de la muestra, de ahí que sólo puedan identificarse con facilidad las estructuras perpendiculares a la membrana: los tres picos de densidad que se distinguen en cada molécula de bacteriorrodopsina (*contornos circulares*) evocan a tres hélices alfa vistas desde sus extremos. Sin embargo, la molécula incluye también una banda continua de densidad (*contornos en crestas*), de mayor ambigüedad.

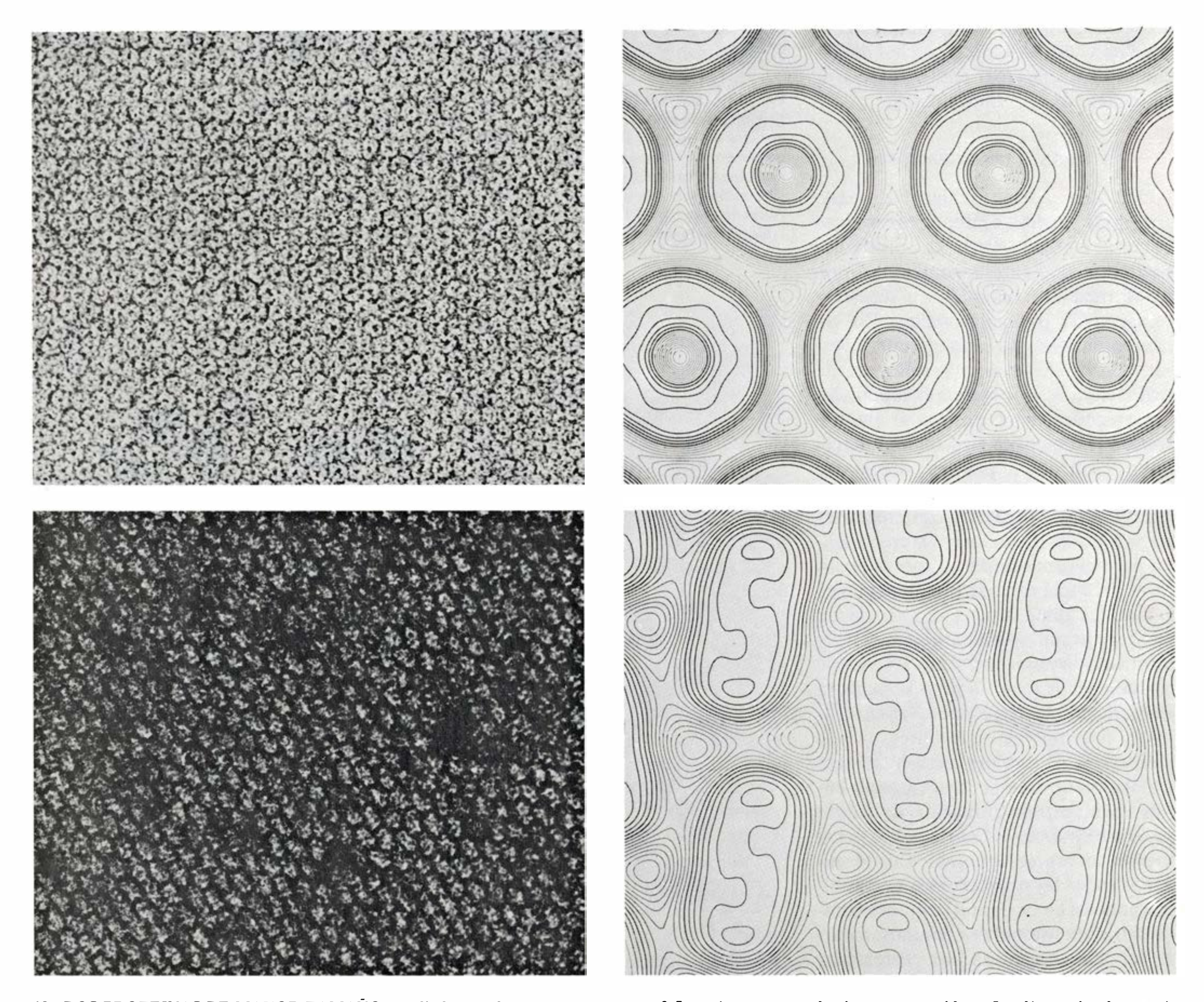


9. PERSPECTIVA TRIDIMENSIONAL de la disposición de las moléculas de bacteriorrodopsina y lipídicas que se revela al apilar mapas de nivel correspondientes a niveles de densidad de distintas alturas. Los contornos en crestas de la perspectiva de proyección se resuelven ahora en cuatro conjuntos separables de contornos aproximadamente circulares. Representan cuatro hélices alfa más, inclinadas respecto de la perpendicular. Cada molécula de bacteriorrodopsina consta, por tanto, de siete hélices alfa. La figura 1 recoge una imagen de superficie lisa de los contornos que delinean un único nivel de densidad.

Aunque esto nos resultaba imposible, sí conseguimos registrar 18 micrografías con inclinaciones de cero a 57 grados, moviendo la muestra de forma que cada micrografía correspondiera a un agregado diferente de membrana, no dañado por el haz electrónico. Las transformaciones de Fourier de estas micrografías nos dieron las amplitudes y fases del conjunto de términos de Fourier. Para obtener mejores valores de amplitud registramos también 15 diagramas de difracción electrónica a diferentes ángulos de inclinación. Combinando la información obtenida por los dos métodos en un cálculo de síntesis de Fourier representamos los resultados en 10 mapas de nivel, correspondiente cada uno a un nivel diferente de la membrana.

Se comprobó que la molécula de bacteriorrodopsina constaba de siete bastoncillos de densidad, presumiblemente segmentos de hélices alfa de la cadena polipeptídica, que atravesaban toda la membrana. Tres de los bastoncillos se disponían, en efecto, perpendicularmente al plano de la bicapa, como habíamos sospechado apoyados en la perspectiva de proyección. Los otros cuatro se inclinaban ligeramente, lo que explicaba la superposición parcial en la perspectiva de proyección y la pobre resolución de los bastoncillos en esta imagen. Las direcciones en las que apuntaban las inclinaciones de los bastoncillos coincidían con lo deducido de la elaboración teórica sobre empaquetamiento lateral de hélices alfa avanzada ya en 1953 por F. H. C. Crick.

No se distinguían, a una resolución de 0,7 nanómetros, los segmentos de cadena polipeptídica que conectaban los bastoncillos. Podíamos, sin embargo, estimar la longitud total de esos segmentos no helicoidales mediante sustracción del número de aminoácidos necesario para completar las siete hélices de los 248 que, según sabíamos, contenía la proteína completa. La diferencia, unos 70 aminoácidos, sugería que se trataba de cortos puentes que conectaban las hélices en las dos superficies de la membrana. Impresión que se confirmó cuando Yu. A. Ovchinnikov, del Instituto M. M. Shemyakin de Química Biorgánica de Moscú, y el grupo de H. Gobind Khorana, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, determinaron la secuencia de aminoáci-



10. DOS PROTEINAS DE MAYOR TAMAÑO estudiadas por los autores y sus colegas; se trata del conexón (*arriba*) y la citocromo *c* oxidasa (*abajo*). Se muestran aquí sus micrografías (*izquierda*) y los mapas de proyección (*derecha*). Las micrografías, de muestras sometidas a tinción negativa, ofrecen más contraste que la micrografía de bacteriorrodopsina no teñida, pero, al presentar menos unidades repetitivas por unidad de área, la resolución de sus mapas es menor: solamente unos 1,8 nanómetros en el caso del conexón y unos 2,5 nanómetros para la citocromo *c* oxidasa. Las líneas circulares más destacadas del mapa del conexón sugieren la existencia de un anillo de seis lóbulos alrededor de una región central de densidad menor (*contornos grises*): un canal que atraviesa la membrana. El mapa de la citocromo *c* oxidasa sugiere que la proteína se presenta en forma de dímero; las dos moléculas estarían relacionadas por un eje binario de simetría. Los mapas tridimensionales de nivel de las dos proteínas revelaron aún más detalles de sus estructuras.

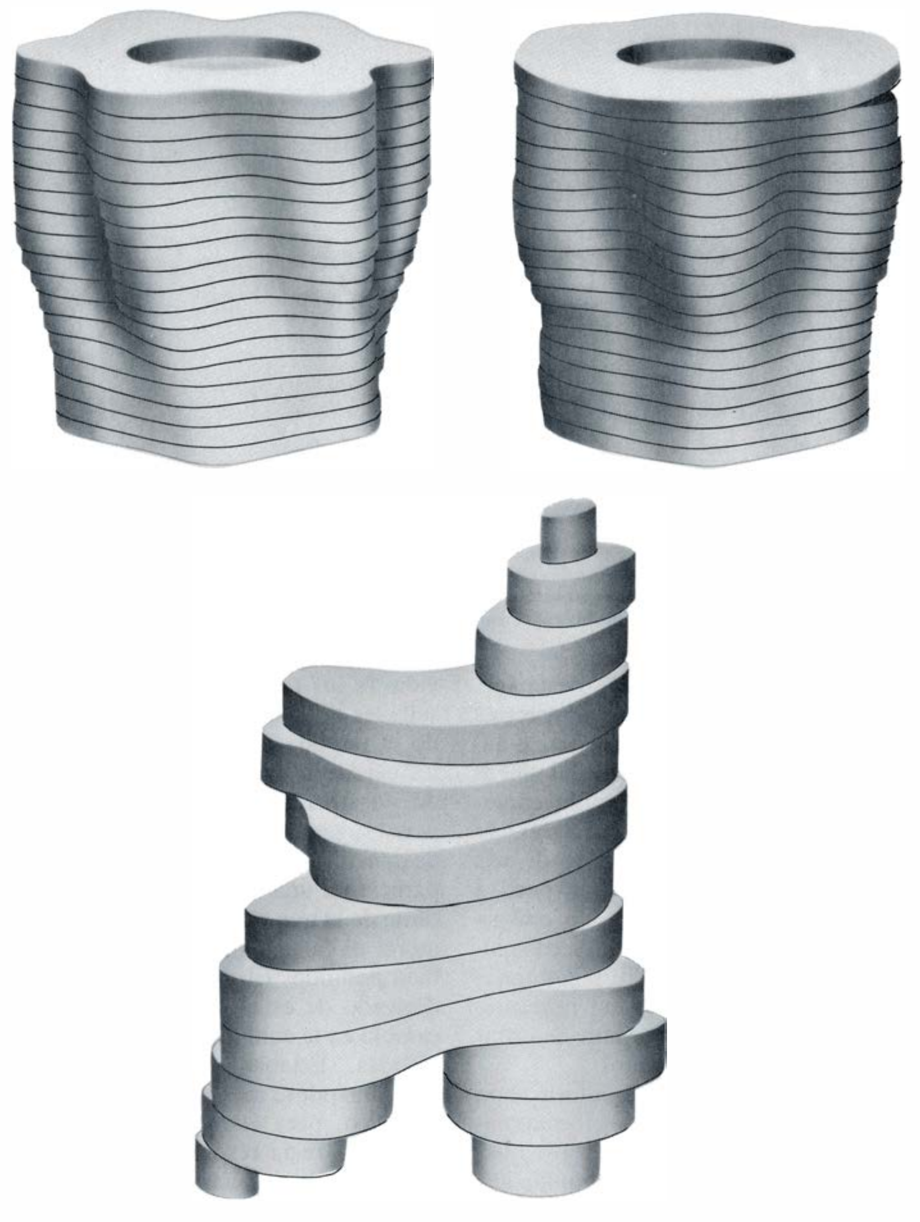
dos de la bacteriorrodopsina. Encontraron siete segmentos de residuos, generalmente hidrofóbicos, separados por breves segmentos hidrofílicos, secuencia que parece corresponder a siete bastoncillos de hélice alfa situados en la membrana, con puentes de conexión en las dos superficies.

Los datos químicos estructurales disponibles no bastan para proporcionar una descripción completa de la molécula de bacteriorrodopsina ni del mecanismo por el que bombea protones. Para ello se precisa conocer las posiciones exactas de cada aminoácido y del grupo retinal. Sin embargo, nuestros hallazgos estructurales confirman que los principios generales derivados de los estudios de proteínas hidrosolubles por rayos X son también aplicables a las proteínas liposolubles ubicadas en las membranas.

Conexones

Las células adyacentes necesitan comunicarse entre sí cuando coordinan su metabolismo y trabajan conjuntamente en el tejido. Se comunican por medio de cortos conductos intercelulares, dispuestos en agregados discoidales en lo que se llaman "uniones *nexus*". Cada conducto se compone de dos proteínas, más o menos cilíndricas, llamadas conexones. Cada conexón está implantado en una de las membranas celulares yuxtapuestas y se extiende por el espacio intercelular, donde se une con un conexón contiguo, formando una vía continua entre los interiores de las células. Un conexón se compone de varias subunidades, cada una de las cuales tiene aproximadamente el mismo peso molecular que una molécula de bacteriorrodopsina. Las subunidades están dispuestas de forma que dan un canal central: la luz del conducto intercelular. Mediante microinyección de colorantes fluorescentes de varios tamaños en una única célula, y observando su penetración en las células vecinas, Werner R. Loewenstein y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Miami, determinaron el diámetro del canal en 1,5 o 2 nanómetros, suficiente para que, además de iones (átomos cargados) pequeños, lo atraviesen ciertas moléculas nutrientes y moléculas mensajeras, AMP cíclico, por ejemplo.

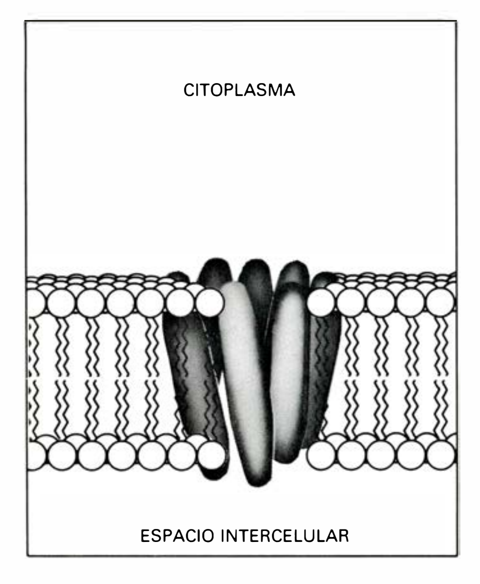
Aislando uniones *nexus* en una solución de detergente se obtienen organizaciones cristalinas hexagonales de conexones en dos capas yuxtapuestas de membrana que mantienen la integridad de los conexones contiguos, unidos aún

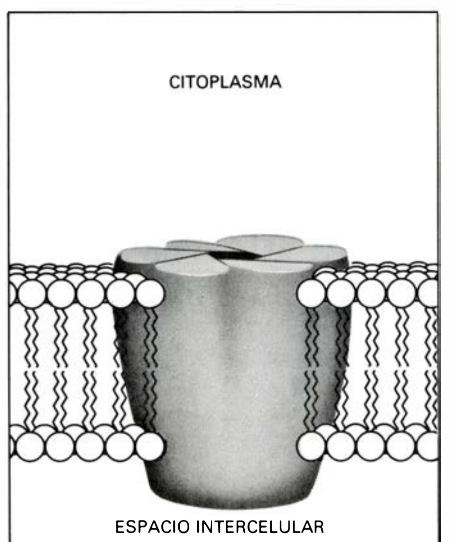


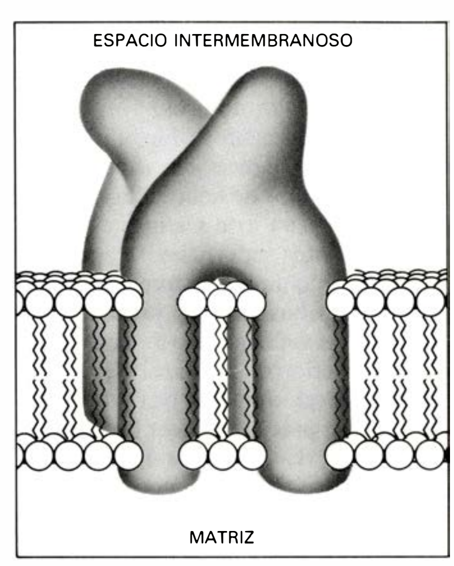
11. DIBUJOS ESQUEMATICOS de dos conexones (*arriba*) y de una única molécula de citocromo *c* oxidasa (*abajo*), basados en modelos derivados de sus mapas tridimensionales. El conexón se estudió tanto en un medio libre de calcio (*izquierda*) como en presencia de calcio (*derecha*). El calcio hace que roten las seis subunidades inclinadas y que se sitúen más cerca de la perpendicularidad al plano de la membrana, lo que parece provocar la constricción del canal central. El monómero de citocromo *c* oxidasa es una gran molécula con forma de *Y*. Su tallo sobresale de la membrana interna mitocondrial y se une al enzima.

entre sí. Estas organizaciones abarcan menos unidades repetitivas que los agregados de membrana púrpura, por lo que su análisis por microscopía electrónica se efectúa a menor resolución. Examinamos las muestras con dos técnicas complementarias: tinción negativa, que define solamente las superficies externas hidrofílicas, y el método mencionado antes, en el que se congela la membrana en una fina capa de agua. Las diferencias de densidad entre proteínas, lípidos y hielo dan suficiente contraste para mostrar los detalles internos de las membranas de las uniones *nexus*; las diferencias de densidad entre las proteínas y el agua (que es mucha en comparación con la diferencia entre las proteínas y la glucosa) destacan las partes de la proteína que sobresalen de la bicapa. Las ventajas que ofrece observar las uniones en un medio realmente acuoso compensan con creces la dificultad de mantener estable la muestra congelada en el vacío del microscopio electrónico.

En las micrografías de uniones *nexus* con tinción negativa los conexones aparecían como un anillo dispuesto alrededor de una región central en la que se concentraba el colorante: el canal. Para examinar la organización de las subunidades alrededor del canal, Guido A. Zampighi, del Hospital Clínico de la Universidad Duke, y uno de nosotros (Unwin) aplicaron los procedimientos







12. PROTEINAS DE MEMBRANA sobre cuya configuración tridimensional se dispone de mejor información, representadas a la misma escala. La bacteriorrodopsina (*izquierda*) es un monómero; el conexón (*centro*) es un hexámero con subunidades idénticas, y la citocromo *c* oxidasa (*derecha*) es un complejo dimérico en el que cada mitad tiene siete cadenas polipeptídicas. Las dos primeras proteínas son de la membrana celular; la tercera es mitocondrial.

de análisis y reconstrucción de imágenes descritos antes. En una perspectiva proyectada a una resolución de 1,8 nanómetros, se apreciaba que las líneas de nivel que definían el anillo contenían seis modulaciones lobulares, lo que evocaba un canal rodeado de seis subunidades proteicas. La perspectiva proyectada se complicaba, sin embargo, por la superposición de los conexones implantados en las dos membranas yuxtapuestas. De nuevo era necesario un mapa tridimensional para describir la configuración estructural.

La combinación de la información procedente de muchas imágenes tomadas a diferentes ángulos mostró que, efectivamente, había seis subunidades. Sobresalían de ambas superficies de la membrana, extendiéndose menos de 1 nanómetro por el citoplasma de la célula y entre 1,5 y 2 nanómetros fuera de la célula, donde se unían a los conexones contiguos. Las subunidades se inclinaban en direcciones opuestas en los lados contrarios del canal, prueba de que mantenían un cierto ángulo con su eje. La dirección de inclinación coincidía con la de los elementos en hélice alfa de la bacteriorrodopsina. El mismo canal presentaba una forma ahusada: su anchura era de unos 2 nanómetros cerca del extremo extracelular y lo suficientemente estrecha cerca del extremo citoplásmico para no resolverse completamente.

El efecto de apertura

Se sabe que, en los tejidos vivos, los canales de las uniones *nexus* se abren y cierran en respuesta a los cambios de las condiciones intracelulares. Este efecto de apertura es crucial para la vida de los tejidos; entre otras cosas, sella las células que mueren, impidiendo la pérdida de nutrientes vitales de las células sanas adyacentes. Algunas de nuestras imágenes de las uniones *nexus* sugerían el mecanismo molecular de apertura y cierre, mostrando lo que parecía ser una forma de conexón diferente de la que habíamos analizado primero: el canal central no aparecía tan bien definido. El mapa tridimensional derivado de estas imágenes reveló un cambio en la configuración de las subunidades. Estaban menos inclinadas, aproximándose más en el extremo citoplásmico, para estrechar el canal. El cambio parecía responder a pequeños movimientos de inclinación y resbalamiento de las subunidades a lo largo de sus líneas de contacto. Se nos ocurrió que tales desplazamientos, semejantes en cierta manera a los que abren y cierran el diafragma del objetivo de una cámara, podrían ser responsables de la apertura y cierre de los canales en el tejido vivo.

Peter D. Ennis y uno de nosotros (Unwin), en la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, contrastaron recientemente esta hipótesis. Demostraron que la apertura y cierre de las uniones *nexus* dependen del nivel intracelular de iones calcio. Aplicaron la técnica de congelación para determinar la estructura de la proteína tanto en ausencia como en presencia de iones calcio. El calcio, en efecto, enderezaba las subunidades y estrechaba el canal, lo que confirmó que esa reorganización probablemente regule el paso de moléculas entre los interiores de las células vivas.

Queda mucho por saber del ensamblaje de los conexones. Algo se ha avanzado, no obstante, con los trabajos apoyados en el uso de rayos X. Lee Makowski, Donald L. D. Caspar, Daniel A. Goodenough y Walter C. Phillips, de la Universidad de Brandeis, han obtenido diagramas de difracción de rayos X (a partir de píldoras de uniones *nexus*) que sugieren que, a diferencia de la bacteriorrodopsina, las cadenas polipeptídicas de los conexones tienen algunas regiones con hojas beta (frente al absoluto predominio de las de tipo hélice alfa). Esperamos preparar cristales dotados de un número de unidades repetitivas mucho mayor que las muestras que hemos analizado hasta ahora. Ello nos permitiría mejorar la resolución de nuestros mapas, al tiempo que reduciría la exposición de la muestra al haz electrónico, con lo que se eludiría el problema del daño por radiación. Los mapas con mayor resolución ofrecerían, pormenorizada, la configuración de las cadenas.

Citocromo *c* oxidasa

La tercera proteína de membrana cuya estructura tridimensional comienza a manifestarse es la citocromo *c* oxidasa, enzima formado por siete cadenas polipeptídicas, al menos. Unas seis veces mayor que la bacteriorrodopsina, no se encuentra en la membrana celular, sino en la membrana interna mitocondrial, el orgánulo celular que transduce la energía, donde cataliza la oxidación del citocromo *c*. En la reacción, cuatro protones del interior de la mitocondria (la matriz) se combinan con cuatro electrones de moléculas de citocromo *c* (en el lado exterior de la membrana interna) y una molécula de oxígeno, rindiendo dos moléculas de

agua. La eliminación de protones del interior de la mitocondria crea un gradiente de protones a través de la membrana interna, gradiente que alimenta la producción de adenosín trifosfato (ATP), la unidad de transacción de energía del metabolismo.

Las membranas mitocondriales no contienen formaciones cristalinas de citocromo *c* oxidasa, pero pueden obtenerse tratando las mitocondrias con detergentes que extraen selectivamente algunos de sus componentes y concentran otros. Roderick A. Capaldi, de la Universidad de Oregon, descubrió que dos de esas formaciones sólo contenían citocromo *c* oxidasa. James F. Deatherage y uno de nosotros (Henderson), conjuntamente con Capaldi y Stephen D. Fuller, han analizado los dos cristales. Para examinar las porciones de las proteínas que sobresalen de la membrana se sometieron las muestras a tinción negativa; para observar las partes implantadas en la membrana se aplicó una película de glucosa.

Las siete cadenas polipeptídicas de la citocromo *c* oxidasa difieren en tamaño y en sus secuencias de aminoácidos; y la asimetría química de la proteína se refleja en su forma. La porción de la estructura que en su mayor parte queda implantada en la bicapa lipídica se divide en dos dominios claramente resueltos, que sobresalen menos de 2 nanómetros en la matriz. Tales dominios se conectan con un tercer dominio, de mayor tamaño, que sobresale unos 5,5 nanómetros de la superficie opuesta (exterior) de la membrana interna, el mismo lado que reacciona con el citocromo *c*. El conjunto tiene forma de *Y* con un brazo más corto que otro, quedando ambos casi totalmente implantados en la bicapa lipídica, y emergiendo el tallo hacia el espacio intermembranar. Tuvimos la fortuna de que las moléculas de proteína se dispusieran de manera distinta en las dos formaciones cristalinas, lo que nos permitió detectar la zona de separación entre moléculas vecinas. En una formación, que parece reflejar el estado del enzima en su medio normal, la proteína se presenta como un dímero en el que las dos moléculas que lo componen se relacionan por un eje binario de simetría.

Como en el caso de los cristales de uniones *nexus*, el número relativamente pequeño de unidades repetitivas del cristal bidimensional limitaba la resolución de nuestra imagen de la citocromo *c* oxidasa. La oxidasa es una proteína singularmente grande: un complejo dimérico de siete cadenas polipeptídicas diferentes con un peso molecular total de 330.000. Parece probable, por tanto, que se logre resolver la estructura de alta resolución de las dos proteínas más pequeñas antes que la de la citocromo *c* oxidasa.

Estructura de las proteínas de membrana

¿Qué conclusiones generales sobre la estructura de las proteínas de membrana pueden extraerse de estos primeros estudios tridimensionales? Indican que el plegamiento de estas cadenas polipeptídicas de proteínas y otros aspectos de su diseño son similares a los de las proteínas hidrosolubles. Las cadenas parecen plegarse en grupos regulares de hélice alfa y hojas beta en las porciones de las proteínas que atraviesan la parte interior, hidrofóbica, de la bicapa, y muestran plegamientos y torsiones irregulares fuera de la membrana. Los grupos de hélices y hojas probablemente se fundan en moléculas compactas, globulares, de distintos tamaños, formas y números de cadenas polipeptídicas. Varias de esas moléculas podrían asociarse dentro del plano de la membrana para crear estructuras complejas, comparables a ciertos enzimas hidrosolubles formados por varias subunidades que sufren pequeñas reorganizaciones "cooperativas" en respuesta a estímulos específicos.

Para comprender el funcionamiento de las proteínas de membrana habrá que conocer en detalle esos rasgos estructurales. El avance de las técnicas de microscopía electrónica, junto con la identificación de las secuencias de aminoácidos, quizá permitan pronto la elaboración de los mapas de algunas proteínas en detalle atómico, lo que supone una resolución próxima a los 0,2 nanómetros.

También han registrado progresos las técnicas de difracción de rayos X aplicadas a las proteínas de membrana. Hartmut Michel, del Instituto Max Planck de Bioquímica de Munich, ha desarrollado un nuevo método para cristalizar esas proteínas en tres dimensiones tratándolas con detergentes de bajo peso molecular; Jürg Rosenbusch y Michael Garavito, del Biozentrum de Basilea, han diseñado un método parecido. La posibilidad de preparar grandes cristales tridimensionales de proteínas de membrana anuncia la aplicación de las poderosas técnicas de difracción de rayos X, ya dominadas, al análisis de la estructura molecular con resolución atómica. Los investigadores de Munich y Basilea, empeñados en el estudio de dos proteínas de membrana muy diferentes, han dado ya pasos firmes hacia ese objetivo.

Espectroscopía de gases sobreenfriados

Una nueva técnica para enfriar un gas muy por debajo de la temperatura normal de condensación simplifica notablemente su espectro. Se consigue de este modo una finísima resolución de los complejos estados de energía molecular

Donald H. Levy

Tradicionalmente, los productos químicos y sus reacciones se han estudiado mediante determinaciones globales que describen las propiedades medias de una cantidad importante de material. El grado total de calor liberado en una reacción, la cantidad de un producto químico que se genera y el tiempo necesario para que la reacción produzca cierta cantidad de dicho producto son propiedades de los agregados macroscópicos de la materia. Aunque la determinación de estos datos no ha perdido interés, la moderna química física se preocupa, cada vez más, de lo que sucede en un nivel molecular. Y se diseñan muchos experimentos para estudiar la estructura de cada molécula, mediante qué mecanismo se almacena su energía y la probabilidad de que ésta reaccione con otra molécula cuando ambas colisionan. Tales investigaciones abordan las propiedades estáticas y dinámicas de la molécula.

La espectroscopía molecular es una de las herramientas más potentes para el examen de las propiedades microscópicas de una sustancia. La materia no absorbe uniformemente la luz de todas las frecuencias; antes bien, ciertas frecuencias son absorbidas fuertemente, mientras que otras no se absorben en absoluto. De una manera análoga, la materia en estado excitado puede fluorescer o emitir luz de ciertas frecuencias. La cantidad de luz absorbida o emitida por una agrupación de moléculas, en función de la frecuencia o color de la luz, constituye el espectro molecular de la sustancia. Del análisis e interpretación de las frecuencias presentes en un espectro molecular se recaba mucha información sobre las propiedades físicas de las moléculas que originan dicho espectro.

En principio, cuanto más complejo es el espectro molecular, mayor información aporta sobre la molécula. Sin embargo, en la práctica, la excesiva complejidad del espectro de un compuesto puede entorpecer su análisis. Sirva de ejemplo el espectro de absorción a las frecuencias de luz visible. Conforma una agrupación de líneas oscuras, salvadas por diversos intervalos, sobre un arco iris de colores que va del rojo al violeta. Las líneas oscuras representan las frecuencias de luz absorbida; el resto del espectro se compone de luz transmitida, que atraviesa el compuesto sin ser absorbida. Para muchas sustancias, las líneas espectrales oscuras resultan tan densas que no pueden separarse ni siquiera con instrumentos de la máxima resolución disponible; de hecho, algunas líneas se hallan tan próximas entre sí que su resolución queda vedada en virtud del principio de incertidumbre. De ahí que cualquier técnica experimental que logre reducir el número de líneas espectrales, simplificando en consecuencia el espectro molecular, resulte de suma utilidad. Aunque parezca contradictorio, lo que se ha estado buscando es un medio de reducir la cantidad de información contenida en el espectro con el fin de facilitar la interpretación de la información restante.

A lo largo de los últimos años, he venido desarrollando, con mis colegas de la Universidad de Chicago, una técnica, basada en las propiedades de los gases a temperatura muy baja, mediante la cual se reduce sistemáticamente el número de líneas espectrales absorbidas o emitidas por sustancias gaseosas. Nuestra estrategia es simple. La línea oscura de un espectro de absorción indica que la sustancia ha absorbido, por lo menos, un fotón o cuanto de luz: la absorción de luz va acompañada por la transición de la sustancia desde su estado energético inicial a un estado superior más energético. Análogamente, en la fluorescencia la emisión de un fotón marca la transición de la sustancia desde un determinado estado inicial de energía a otro inferior, dotado de menos energía. Las leyes de la mecánica cuántica exigen que la frecuencia del fotón, en otras palabras la posición de su línea en un espectro, sea proporcional a la diferencia de energía entre el estado inicial y el final.

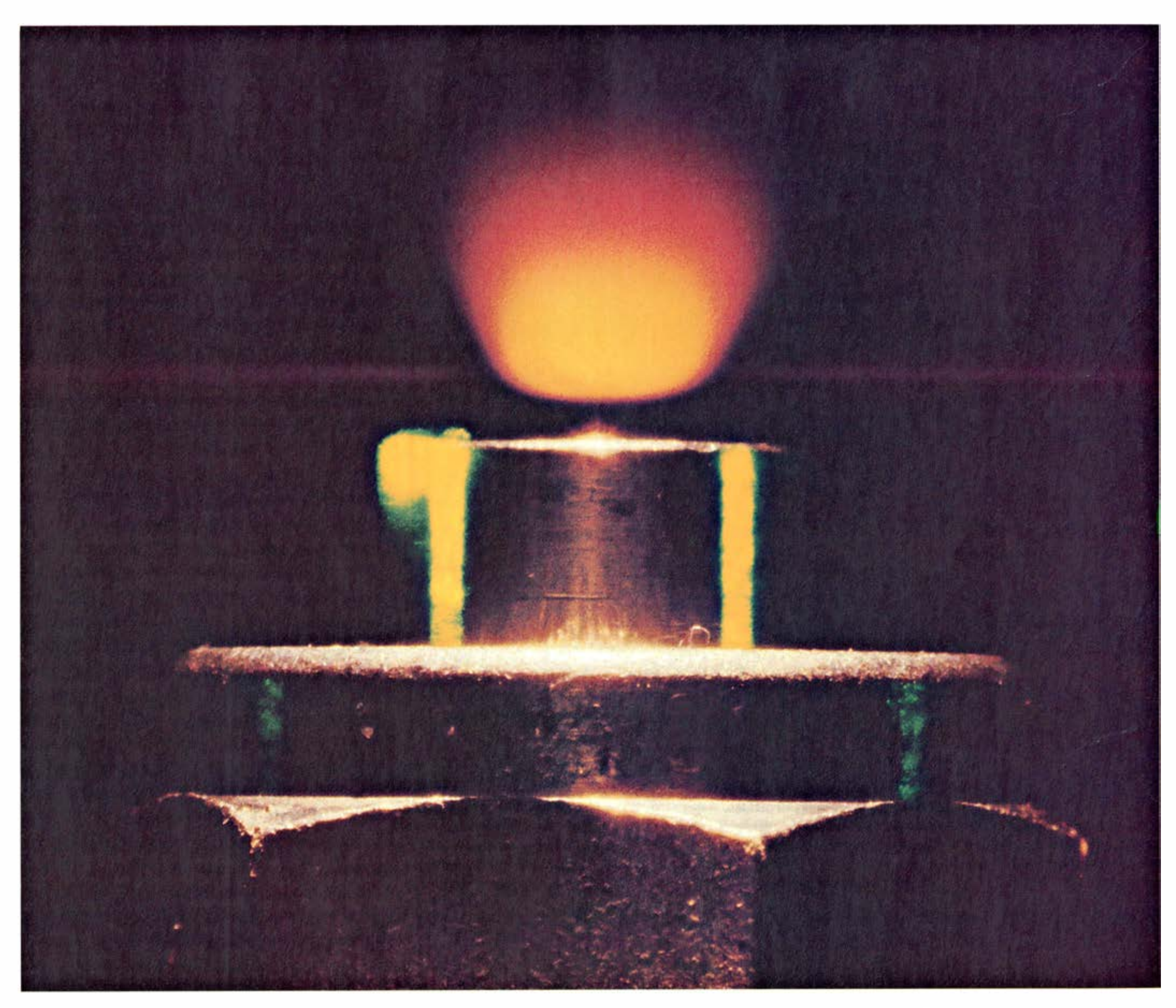
El número de posibles transiciones de energía, y por tanto el número de líneas en el espectro, puede elevarse si las moléculas que componen una sustancia existen en muchos estados diferentes de energía inicial. Por contra, si el número de estados energéticos iniciales es limitado, el número de transiciones posibles se reduce, con lo que el espectro resultante admite un tratamiento analítico. La forma más práctica de limitar el número de estados iniciales de energía consiste en reducir la temperatura de la sustancia, porque a temperaturas bajas sólo están poblados los estados de menor energía. De ahí que nuestra estrategia para reducir la complejidad espectral se apoye en el registro del espectro de la sustancia a temperaturas comprendidas dentro de un grado a partir del cero absoluto.

Si el único requisito para la espectroscopía de alta resolución fuese un refrigerador convencional de baja temperatura, sobraría nuestra técnica. Sin embargo, a bajas temperaturas las moléculas tienden a condensarse en el estado líquido o sólido; las interacciones entre ellas provocan variaciones significativas en el espectro. Considerando los notables avances en electrónica merced al desarrollo de la física del es-

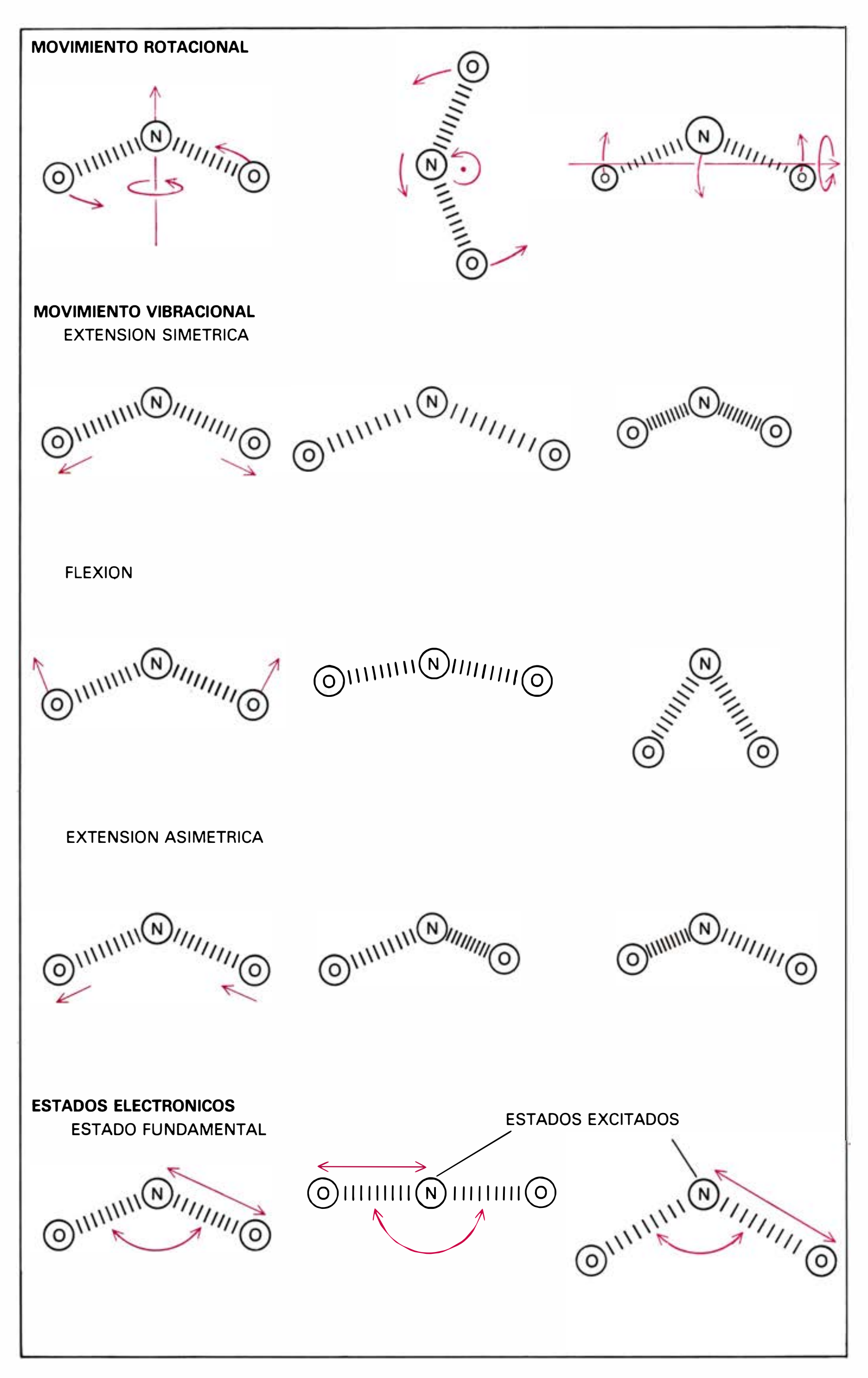
tado sólido, no queda duda de que la espectroscopía de la materia condensada (líquida o sólida) constituye una técnica de investigación de gran valor. No obstante, también importa estudiar las propiedades de las moléculas solas, libres de cualquier interacción con su entorno. Este tipo de estudio se realiza mejor en fase gaseosa. Las líneas espectrales que se identifican con la absorción o emisión de luz por un gas a baja presión proceden, exclusivamente, de las transiciones entre los estados de energía de cada una de las moléculas de gas. Por tanto, el problema estriba en enfriar un gas lo suficiente como para limitar el número de estados iniciales de energía, sin dejar que éste se condense y forme un líquido o sólido.

Llegados aquí, será útil considerar las propiedades físicas responsables de las líneas espectrales. De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, no se puede agregar energía a una molécula en cantidades arbitrarias. Si hay que añadir o extraer energía de la molécula, será la suficiente para transportarla a su inmediato estado, superior o inferior, de energía; no hay otra forma de modificar el estado inicial de energía.

La radiación electromagnética se absorbe o emite en unidades indivisibles denominadas fotones. En ciertos contextos, el fotón se describe mejor como partícula; en otros, como onda. En este segundo caso, tiene una frecuencia y una longitud de onda. Recordemos que la energía del fotón es directamente proporcional a su frecuencia y, por ello, la absorción o emisión de un fotón señalará la transición de una molécula de un nivel de energía a otro. Un espectro molecular presenta un enorme intervalo de frecuencias. Las transiciones a baja energía, que ocurren entre niveles de energía muy próximos, vienen señalizadas por los fotones de radiofrecuencia; las transiciones entre niveles situados a una distancia intermedia, por fotones infrarrojos; y las transiciones entre niveles muy espaciados, por la luz visible, los fotones ultravioleta y los rayos X. Los diversos tipos de movimiento molecular o grados de libertad



1. UN CHORRO LIBRE SUPERSONICO de helio gas sembrado con una pequeña cantidad de iodo molecular (I_2) adquiere una fluorescencia de color amarillo naranja durante la exposición a la radiación energética de un láser. La trayectoria del haz del láser queda indicada por la delgada línea de luz roja fluorescente creada por el haz en su recorrido a través del gas residual que rodea al chorro. El chorro de gas emerge del recipiente presurizado a través de un pequeño orificio, de un diámetro aproximado de 0,5 milímetros, y se expande a velocidad supersónica en el interior de una cámara de vacío, en donde queda expuesto al haz del láser. La rápida expansión del chorro enfría el gas y simplifica el espectro de emisión de luz fluorescente. La espectroscopía de fluorescencia inducida por láser sobre chorros libres supersónicos de gas se ha convertido en una importante y potente sonda de la estructura y dinámica moleculares. La fotografía fue obtenida por Fritz Goro en el laboratorio del autor en el James Franck Institute de la Universidad de Chicago.



2. SE ACUMULA LA ENERGIA MOLECULAR en el movimiento rotacional o vibracional de la molécula, así como en la configuración de los electrones orbitales. Aquí se ilustran los tres modos rotacionales y los tres vibracionales de la molécula de dióxido de nitrógeno (NO_2). La cantidad de energía rotacional acumulada depende de la velocidad rotacional y de los momentos de inercia de la molécula en el sentido de los principales ejes de rotación. La estructura de la energía electrónica también puede alterar la configuración de los núcleos. Para mayor claridad se han omitido aquí los orbitales de los electrones.

pueden asociarse, pues, con la absorción o emisión en determinadas regiones del espectro.

Podemos abordar por separado el movimiento de los núcleos atómicos, pesados y lentos, y el movimiento de los electrones, más ligeros y rápidos, que constituyen una molécula. Los movimientos nucleares, lentísimos, facilitan que los electrones puedan ajustarse casi siempre a la cambiante configuración de los núcleos; de suerte que las órbitas electrónicas alrededor de los núcleos en movimiento son esencialmente las mismas que las que observaríamos si los núcleos estuviesen en reposo. El movimiento nuclear puede dividirse, además, en dos tipos definidos: la rotación total de la molécula y las pequeñas vibraciones de los núcleos alrededor de sus posiciones de equilibrio. Estos dos movimientos son, en buena parte, independientes. El rotacional se aproxima mucho al que observaríamos si la molécula fuese rígida; el movimiento vibracional viene a coincidir con el que se produciría en una molécula inmóvil.

Las transiciones energéticas asociadas a una variación rotacional en una molécula pueden ser muy pequeñas; las transiciones entre los niveles energéticos rotacionales adyacentes se ven, pues, inducidas por fotones de frecuencia muy baja en las regiones de microondas o de radiofrecuencia del espectro. La distancia entre los niveles de energía rotacional viene determinada por los momentos de inercia de la molécula; cada momento de inercia depende, a su vez, de la configuración de los núcleos atómicos en la molécula. Por tanto, el análisis de los niveles de energía rotacional puede conducir a una determinación de las longitudes y ángulos de los enlaces moleculares.

El movimiento vibracional de una molécula puede resultar bastante complejo; y cuanto mayor es la molécula, mayor la complejidad de la gama de niveles energéticos. Las distancias que median entre los niveles de energía vibracional suelen superar las que hay entre los niveles de energía rotacional, lo que explica que las frecuencias de los fotones asociados a las transiciones vibracionales se sitúen dentro de la región del infrarrojo del espectro. Por ello, la espectroscopía de infrarrojo ha constituido la herramienta tradicional para descubrir la estructura de los niveles de energía vibracional. Las frecuencias vibracionales vienen determinadas por la intensidad o rigidez de las fuerzas de recuperación que mantienen los núcleos atómicos en posición; de ahí que el espectro vibracional nos proporcione información sobre las fuerzas responsables de los enlaces químicos.

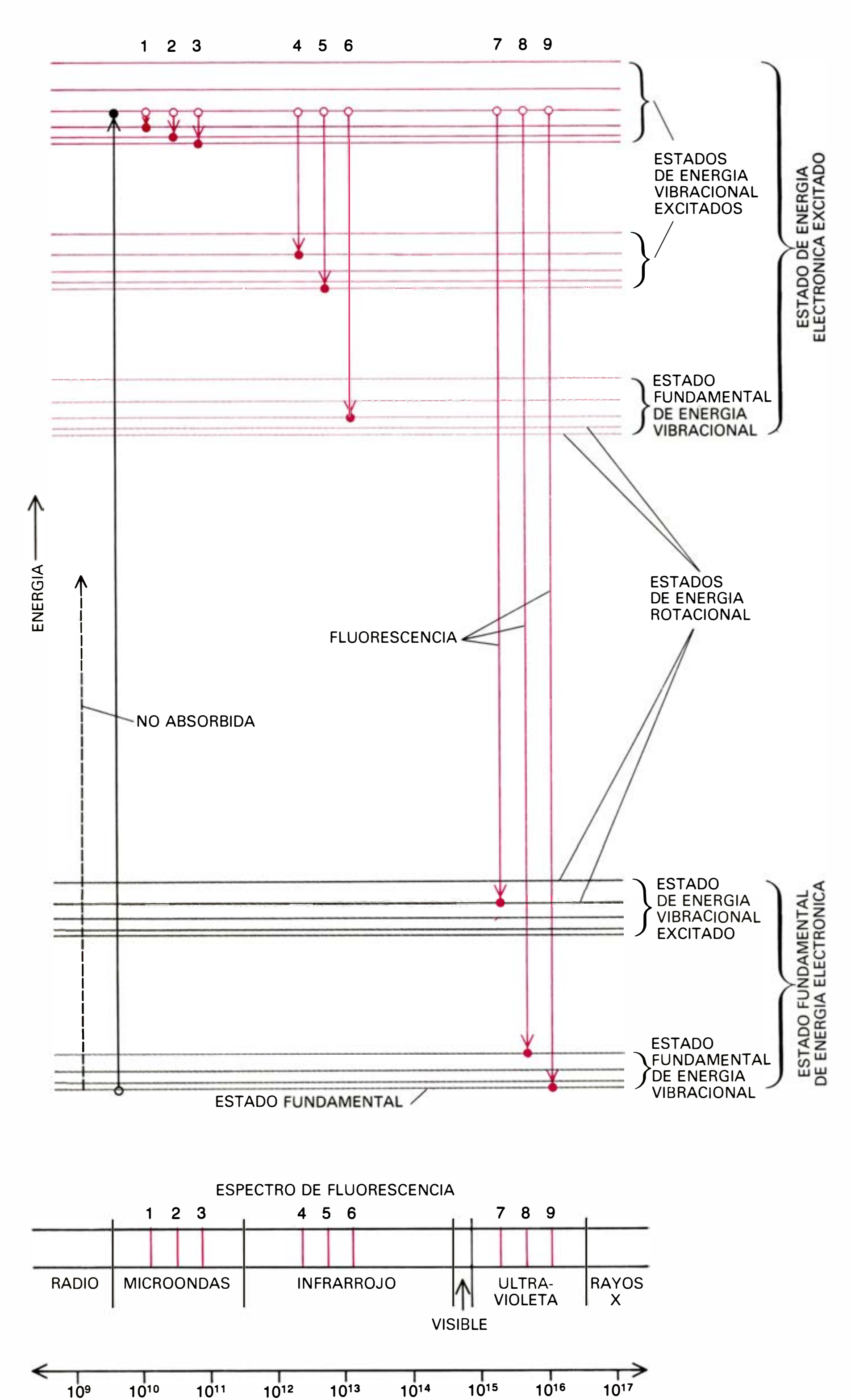
De cuantas partículas se asocian a las transiciones de energía molecular, el electrón es la más ligera. La separación entre los niveles de energía electrónica adyacentes es mayor que las separaciones asociadas a los movimientos rotacionales o vibracionales de los núcleos. En consecuencia, las transiciones entre estados de energía electrónica son inducidas por fotones en las regiones de la luz visible o ultravioleta del espectro. Las propiedades químicas de una molécula, tales como la configuración de sus núcleos atómicos, la fuerza de los enla-

ces que puede formar y su reactividad química, están determinadas por la distribución de los electrones, en particular los de valencia, es decir, los electrones más externos de la molécula. De ahí que diferentes estados electrónicos de la misma molécula pueden considerarse como diferentes especies químicas.

Es posible que un solo fotón provoque variaciones en más de un tipo de estado de energía. Por ejemplo, un fotón infrarrojo puede cambiar el estado vibracional y rotacional de una molécula: la mayor parte de la energía se consume en la excitación vibracional, pero una pequeña fracción de la misma provoca asimismo una excitación rotacional. De esta forma, cada estado vibracional se divide en múltiples niveles de energía representativos de los posibles estados rotacionales de la molécula correspondientes a un determinado estado vibracional. En general, una transición de energía desde otro estado vibracional hasta uno de estos niveles corresponde a una transición vibracional y a una transición rotacional. Igualmente, un fotón de luz visible o un fotón de luz ultravioleta pueden provocar, a su vez, transiciones electrónicas, vibracionales y rotacionales. Un estado de energía electrónica se compone de una serie de estados de energía vibracional, cada uno de los cuales se subdivide en niveles de energía rotacional.

Las transiciones energéticas accesibles para una molécula en un determinado estado de energía pueden dar origen, por tanto, a decenas o centenares de líneas espectrales, aunque no es ésta la complejidad que el espectroscopista desea evitar. De hecho, un espectro así puede ser resuelto y analizado. El problema reside en que el espectro no es nunca el de una sola molécula, sino de una extensa agrupación de ellas, tales como las moléculas de un gas en el interior de una bombilla experimental. En la bombilla, las moléculas ocupan muchos estados de energía diferentes; cada estado origina un espectro diferente. El espectro que se observa es la suma de todos los espectros asociados al gran número de estados de energía inicial.

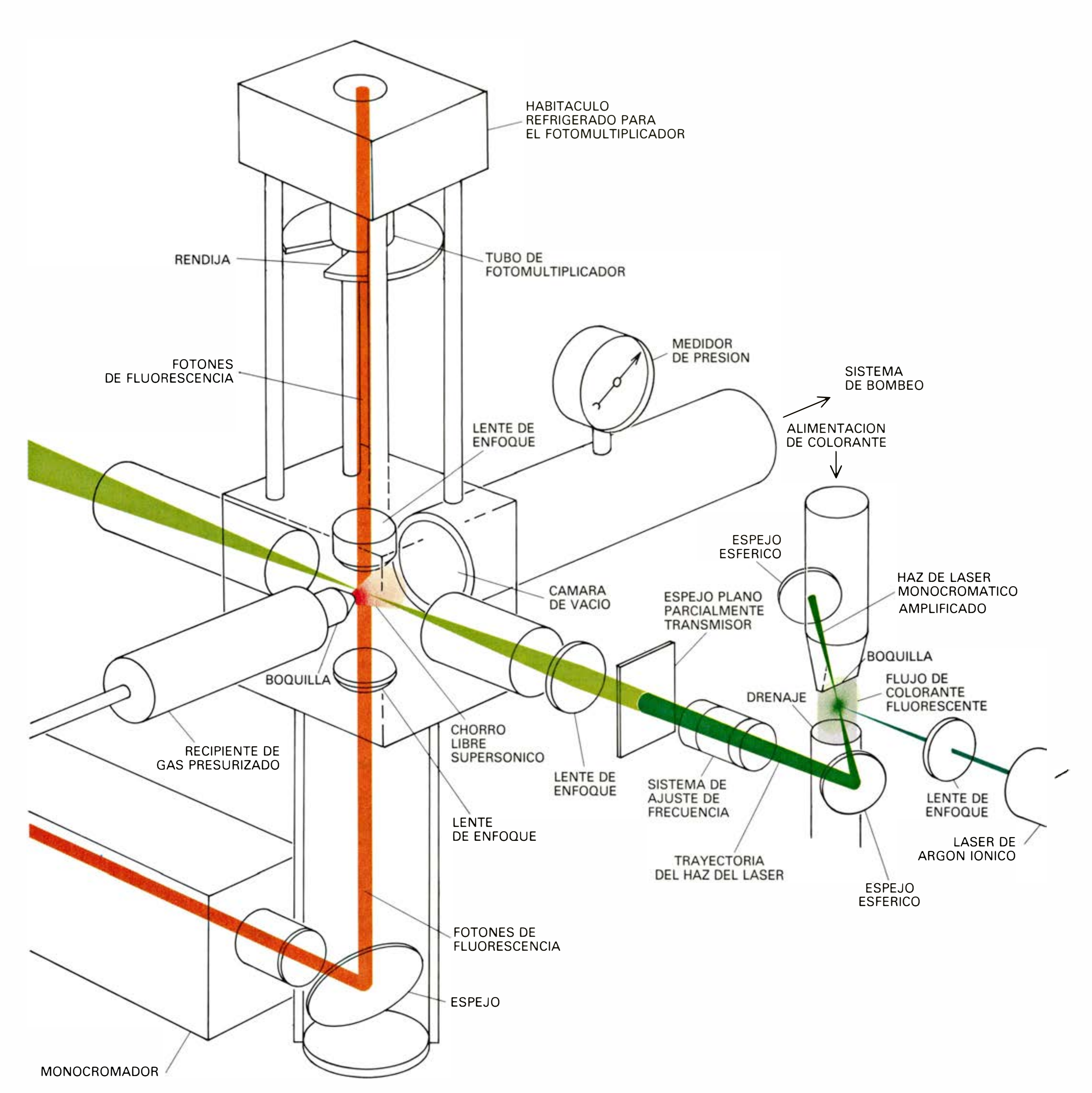
Siempre que las moléculas de un gas pueden intercambiar libremente energía entre sí, están en equilibrio térmico; las leyes de la mecánica estadística hacen posible el cálculo de su distribución entre los diversos estados de energía disponibles. Para cualquier temperatura absoluta, la fracción del total de moléculas del gas que existe en cual-



3. CUANTIFICACION DE LA ENERGIA de una molécula. Puede representarse como una agrupación de líneas horizontales discretas, cada una de las cuales corresponde a un nivel de energía permitida por la mecánica cuántica. Los niveles de energía suelen jerarquizarse en tres niveles: a cada estado vibracional le están permitidos muchos estados de energía rotacional y a cada estado electrónico le están permitidos muchos estados vibracionales. De ahí que cada estado de energía electrónica esté dividido en distintas agrupaciones de líneas; cada agrupación corresponde a un estado de energía vibracional; cada línea de cada agrupación representa un nivel definido de energía rotacional. Las transiciones energéticas de la molécula sólo pueden producirse entre dos niveles de energía; si la energía no corresponde a la diferencia de energía entre dos niveles, las reglas de la mecánica cuántica impiden la transición (*flecha discontinua a la izquierda*). Las transiciones van acompañadas por la absorción (*flecha negra*) o por la emisión (*flechas de color*) de un fotón. La frecuencia del fotón varía directamente con su energía, por lo que los fotones emitidos producen un espectro de líneas intensas que permite deducir ciertas propiedades físicas de la molécula. Las transiciones de energía numeradas corresponden a la numeración de las líneas en el espectro esquematizado más abajo. Las alturas relativas de las transiciones no están dibujadas a escala.

quier estado energético puede calcularse a partir de la ley estadística conocida por distribución de Boltzmann, en honor del físico austríaco Ludwig Eduard Boltzmann. Para calcular la población de un determinado estado de energía hay que conocer la diferencia entre la energía de este estado y la energía del estado fundamental, o estado de mínima energía posible. Esta diferencia E se divide entonces por una constante k, denominada constante de Boltzmann, que aproximadamente equivale a $1{,}4 \times 10^{-16}$ erg por grado Kelvin. Puesto que la constante de Boltzmann se expresa en unidades de energía por unidad de temperatura, la separación de energía entre el estado en cuestión y el estado fundamental viene expresada en unidades de temperatura.

La distribución de Boltzmann da la relación entre el número de las moléculas de un gas que ocupan un determinado estado excitado de energía respecto al número de moléculas que



4. MONTAJE EXPERIMENTAL para observar el espectro de fluorescencia de un chorro libre supersónico. Consta de tres secciones principales; a saber: el aparato para generar el chorro, el láser para excitar las moléculas de gas en el chorro y el detector de los fotones fluorescentes. En este diagrama esquemático, el chorro penetra en el interior de una cámara de vacío a través de un pequeño orificio en el recipiente presurizado. El haz del láser proviene de un láser de colorante, que es bombeado, o alimentado, por un segundo láser, el láser de argón iónico. La frecuencia de la luz emitida por el láser de argón iónico es fija, pero la del láser de colorante puede variarse. Los dos detectores ilustrados en la figura cuentan los fotones emitidos por las moléculas del chorro. El fotomultiplicador cuenta los fotones en todo un intervalo de frecuencias; el monocromador, por su parte, cuenta los fotones de una frecuencia predeterminada. Pueden utilizarse asimismo otros tipos de detector, verbigracia, el de partículas cargadas (que no se recoge en esta ilustración).

ocupan el estado fundamental. De forma equivalente, el cociente es la probabilidad de que una molécula ocupe el estado excitado dividida por la probabilidad de que esta molécula ocupe el estado fundamental. Dicho cociente es igual a e, la base de los logaritmos naturales, elevada a la potencia-$(E/k)/T$, en donde T simboliza la temperatura absoluta del gas. Cuando la diferencia de energía es igual a la temperatura del gas, la ecuación demuestra que el estado excitado tiene una probabilidad de hallarse poblado del 0,37 en relación al estado fundamental. Cuando la diferencia de energía es igual a 2,3 veces la temperatura del gas, el número de las moléculas en el estado excitado es aproximadamente una décima parte del número de moléculas en el estado fundamental. Si la población del estado excitado es por lo menos la décima parte de la población del estado fundamental, denominaremos arbitrariamente estado poblado al estado excitado.

El número de estados poblados depende tanto de la diferencia de energía entre los distintos estados como de la temperatura absoluta. En el cero absoluto, todos los niveles energéticos, salvo el fundamental, están despoblados. La diferencia de energía entre estados de energía rotacional depende del tamaño de la molécula: para pequeñas moléculas diatómicas viene a ser de 1 grado Kelvin; para moléculas poliatómicas de tamaño medio, en torno a 10^{-2} grados, y, para las moléculas mayores en la fase gas es del orden de 10^{-3} grados. Por ello, a temperatura ambiente, a unos 295 grados Kelvin, el número de estados de energía rotacional poblados puede resultar enorme.

La distribución de Boltzmann aclara por qué pueden simplificarse los espectros moleculares enfriando la muestra. A temperaturas suficientemente bajas, las separaciones entre los niveles de energía, incluso para las moléculas de mayor tamaño, son grandes en comparación con la temperatura; en este caso, la mayoría de los niveles pierden su población, desapareciendo del espectro las líneas correspondientes, de modo que el espectro de los pocos niveles poblados restantes se simplifica y resulta más intenso. Las pequeñas separaciones observadas entre los estados de energía molecular implican que, si no se enfría la muestra muy por debajo de 1 grado Kelvin, se hace imposible conseguir la necesaria simplificación espectral.

A fin de poder estudiar las moléculas en fase gaseosa a tales temperaturas, mis colegas y yo confiamos en una novedosa técnica de refrigeración que enfría muy rápidamente las moléculas del gas y las separa antes de que se condensen. El refrigerante es un chorro de gas no colimado o libre, inyectado en el interior de una cámara evacuada en condiciones en las que el flujo es muy superior a la velocidad a la que una onda sonora puede desplazarse en dicho medio; por ello, la técnica recibe el nombre de "espectroscopía de chorro libre supersónico". Imaginemos un recipiente lleno de un gas atómico, helio por ejemplo, presurizado quizás a unas cien atmósferas, y supongamos que dicho recipiente se halla contenido en el interior de una cámara evacuada. Si se practica un orificio en el recipiente, el gas escapará por el agujero hacia el vacío. Con una presión en el recipiente alta o un orificio grande, los átomos del interior del recipiente tenderán a colisionar con los átomos que escapan del mismo; de donde resulta que se impulsa un chorro de gas por el agujero.

Las leyes de la termodinámica establecen que, en condiciones apropiadas, todo gas en expansión se enfría. En una escala microscópica, el enfriamiento de un gas implica que la energía asociada al movimiento aleatorio de las partículas en el gas se reduce. Los átomos de un gas en el interior de una bombilla se desplazan a muy distintas velocidades. Para simplificar, consideremos el movimiento en una sola dirección. Por tratarse de un movimiento aleatorio, cualquier átomo tiene tanta probabilidad de desplazarse a una cierta velocidad hacia la derecha como de hacerlo, a la misma velocidad, hacia la izquierda. Por ello, las velocidades de las partículas hacia la izquierda y la derecha se distribuyen simétricamente alrededor de la velocidad más probable, que es cero. La temperatura del gas remite a medida que aumenta la fracción de partículas que se desplazan a poca velocidad respecto a la velocidad más probable. En otras palabras, la temperatura se mide por la amplitud de la distribución de la velocidad respecto a su valor más probable. A temperaturas bajas, casi todos los átomos se mueven a velocidades próximas a cero, mientras que a temperaturas altas es mayor el número de átomos que se mueven a mayores velocidades hacia izquierda o derecha.

En un chorro libre supersónico, la temperatura también se mide por la amplitud de la distribución de velocidades. En el chorro, la velocidad más probable en una dirección no es cero, ya que el gas se aleja del orificio a una determinada velocidad de flujo distinta del valor cero. La temperatura viene determinada por la amplitud de la distribución de velocidad centrada alrededor de la velocidad de flujo; la temperatura disminuye cuando un número creciente de átomos se mueven aproximadamente a la misma velocidad, aun cuando toda la masa de gas avance a la velocidad de flujo. La definición de la temperatura no depende de la velocidad de flujo, porque las propiedades químicas y físicas de una parcela de gas quedan determinadas por lo que sucede en su inmediata vecindad. Estas propiedades no resultan más alteradas por la velocidad elevada de flujo del chorro de lo que resultarían si el gas se transportase a bordo de un avión que se desplazase a una velocidad elevada y constante.

El estrechamiento de la distribución de velocidad que se observa en una expansión supersónica recibe el nombre de enfriamiento translacional. Consideremos el componente de velocidad transversal de cada átomo, o el componente de la velocidad perpendicular a la dirección de flujo. Si no se produjesen colisiones entre los átomos, los dotados de pequeñas velocidades transversales se mantendrían próximos al centro de la expansión, mientras que los átomos que se moviesen a velocidades transversales muy altas se alejarían de la línea central. En virtud de la segregación espacial de los átomos de acuerdo con sus velocidades transversales, los átomos de cualquier pequeña bolsa de gas bastante alejada de la boquilla han de tener, necesariamente, velocidades transversales similares. En otras palabras, la distribución de velocidad transversal en el interior de cualquier pequeña zona de gas se estrecha, de suerte que la velocidad transversal se atenúa y, por tanto, se enfría el gas.

Sin embargo, cerca de la boquilla, en donde la presión del gas en el chorro es relativamente alta, los átomos colisionan entre sí sin parar. Estas colisiones permiten un equilibrio completo o parcial entre los componentes de la velocidad transversal y los demás grados de libertad en el movimiento de los átomos. En consecuencia, el amortiguamiento de la velocidad transversal conduce a una reducción de la velocidad longitudinal, que es el componente de velocidad paralelo a la dirección de flujo del chorro.

Para poder enfriar un gas molecular de interés espectroscópico, se mezcla

una pequeña cantidad del mismo con una gran cantidad de un gas portador monoatómico, helio por ejemplo. Cuando la mezcla se expande a través de un orificio o boquilla, se enfría translacionalmente. Siempre que la densidad de la mezcla sea lo suficientemente elevada, las moléculas colisionan a baja velocidad con los átomos fríos; la energía del movimiento rotacional de las mismas se transfiere entonces al baño translacionalmente frío de gas monoatómico. Sin embargo, a medida que el gas se aleja de la boquilla, el promedio de distancia entre los átomos y las moléculas aumenta, por lo que disminuye el número de colisiones por segundo entre partículas. Así, el enfriamiento de las moléculas provocado por el intercambio de energía en las colisiones constituye un proceso autolimitante. El enfriamiento es rápido en las primeras regiones del chorro, pero disminuye bruscamente a medida que van resultando cada vez más infrecuentes las colisiones en el chorro.

La relativa independencia de los estados de energía rotacional, vibracional y electrónico de una molécula permite abordar, por separado, el enfriamiento para cada tipo de movimiento. Con estos grados internos de libertad, el enfriamiento equivale a limitar el movimiento de la mayor parte de las moléculas de un gas a los estados de menor energía. El intercambio de energía entre el movimiento rotacional molecular y el movimiento translacional atómico es de suma rapidez, de modo que las rotaciones moleculares se enfrían a una temperatura próxima a la temperatura translacional ordinaria.

Las vibraciones moleculares intercambian energía con el movimiento translacional algo menos deprisa; se enfrían a una temperatura significativamente inferior a su temperatura original, pero superior a la temperatura translacional final. Sin embargo, ambos procesos de enfriamiento son mucho más rápidos que la condensación. De hecho, la principal ventaja del chorro libre supersónico como refrigerante estriba en la posibilidad de enfriar los movimientos moleculares para fines espectroscópicos antes de que las moléculas puedan condensar formando un líquido o un sólido.

En último término, la condensación queda condicionada por el mismo mecanismo que limita el enfriamiento, a saber, la rarefacción del gas a medida que éste se aleja en el chorro. Sin embargo, incluso durante el enfriamiento translacional, la condensación es lenta porque su iniciación requiere colisiones simultáneas entre tres o más partículas. Contrariamente al enfriamiento que sólo requiere el intercambio de energía entre dos partículas en colisión, la condensación exige la adherencia de dos partículas por lo menos. Ahora bien, si se ha de formar un enlace, una tercera partícula tiene que colisionar con las dos primeras durante el tiempo de la colisión de dos cuerpos, de forma que la tercera partícula pueda captar la energía de fijación de la pareja en forma de energía translacional. Las colisiones de tres cuerpos requieren densidades de gas mucho mayores que las colisiones de dos cuerpos; así, el enfriamiento se completa antes de que se produzca un número significativo de colisiones de tres cuerpos. En efecto, el gas molecular se sobreenfría rápidamente o se enfría por debajo de su temperatura de condensación ordinaria; se le permite luego expandirse hasta que su baja densidad impide la formación de agrupaciones de moléculas sobre las que pudiesen condensar otras.

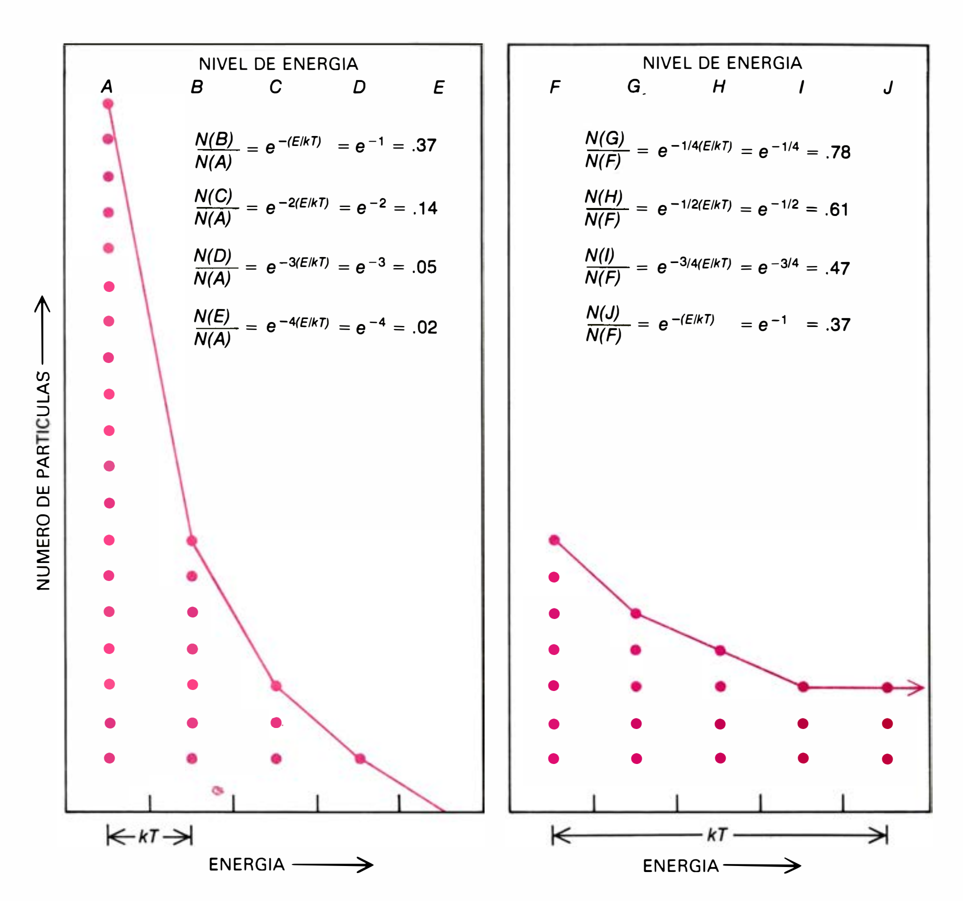
En principio, cualquier clase de espectroscopía molecular que pueda rea-

5. DISTRIBUCION DE LA VELOCIDAD MOLECULAR después de la boquilla; nos determina la temperatura del gas en el chorro. La flecha apunta la dirección de cada molécula y, su longitud, la magnitud de su velocidad. En el interior del recipiente de gas a alta presión la densidad de las moléculas es elevada; sus velocidades, aleatorias en dirección y en magnitud. Además, por hallarse el gas presurizado relativamente caliente, el intervalo, o la dispersión de las velocidades asumidas por las moléculas, es bastante grande. Fuera de la boquilla, la densidad de las moléculas cae precipitadamente y continúa disminuyendo con la distancia. Las colisiones entre las moléculas en el interior del chorro reducen la gama de velocidades moleculares a lo largo de cualquier dirección radial, por lo que todas las moléculas, en cualquier pequeña región del espacio, empiezan a moverse a la misma velocidad. La amplitud de la distribución de velocidades constituye un índice de la temperatura; por tanto, el gas del chorro puede enfriarse a niveles próximos a unas pocas centésimas de un grado del cero absoluto. El sombreado progresivamente más oscuro indica el enfriamiento de la región central del chorro supersónico que produce el espectro.

lizarse sobre gases contenidos en un recipiente puede acometerse también sobre un chorro libre supersónico. En la práctica, la técnica espectroscópica debe adaptarse al chorro, ya que la muestra de gas molecular es reducida. En un experimento típico, piénsese en el estudio del espectro de chorro libre del iodo molecular, la muestra de gas expuesta se compone de 10^8 moléculas y pesa 3×10^{-14} gramos. Con una muestra tan pequeña se precisa un método espectroscópico de gran sensibilidad.

Además de la muestra, la espectroscopía molecular requiere una fuente de luz para excitar las moléculas, sacándolas de sus estados iniciales, y un detector para registrar las líneas espectrales resultantes. La espectroscopía de fluorescencia constituye un método altamente sensible, que nosotros hemos utilizado. Cuando las moléculas del chorro se exponen a la luz de una frecuencia a la que dichas moléculas absorben energía, cada una de ellas puede absorber un fotón del haz luminoso. Después de 10^{-9} a 10^{-6} segundos, una molécula excitada puede volver a ocupar algún grado de menor energía emitiendo otro fotón; en otras palabras, la molécula puede fluorescer. Merced a la detección de un fotón de fluorescencia, es posible deducir que una molécula de la muestra ha absorbido un fotón a la frecuencia luminosa conocida. El espectro resultante, en el que se registra la intensidad de la fluorescencia en función de la frecuencia de la luz incidente, exhibe información similar a la contenida en el espectro de absorción. Los detectores de fluorescencia pueden contar fotones, uno a uno, con gran exactitud, lo que convierte al método en una forma extremadamente sensible para obtener el espectro de absorción.

Si la espectroscopía de fluorescencia se entiende como una reacción química en la que dos reactivos (los fotones incidentes y las moléculas) se combinan para formar un producto (los fotones de fluorescencia), entonces, a pesar de la baja concentración de uno de los reactivos, la velocidad de reacción puede mantenerse a un nivel tolerable forzando un exceso de concentración del otro reactivo. En otras palabras, por ser pequeña la muestra molecular, la fuente de iluminación ha de ser potente. La potencia de dicha fuente es la fuerza por unidad de frecuencia por unidad de ángulo sólido; por tanto, no sólo puede conseguirse potencia luminosa aumentando la fuerza, sino también colimando el haz de luz y limitando los fotones del haz a un estrecho intervalo de frecuencia.



6. DISTRIBUCION DE LAS MOLECULAS en movimiento térmico aleatorio entre los diversos niveles de energía de un gas; viene dada por la distribución de Boltzmann. El número de moléculas que ocupan un determinado nivel de energía en un gas depende de la temperatura absoluta del gas y de la diferencia de energía entre dicho nivel y el estado fundamental, o menor nivel de energía posible. La relación entre el número de moléculas que ocupan dicho nivel y las que se encuentran en el estado fundamental es *e*, la base de los logaritmos naturales, elevada a la potencia $-E/kT$, donde *E* simboliza la diferencia de energía respecto al estado fundamental; *k*, la constante conocida como la constante de Boltzmann y, *T*, la temperatura absoluta. Como *k* se expresa en unidades de energía por grado Kelvin, la cantidad *kT* representa unidades de energía. De ahí que, si la separación *E* entre niveles de energía es aproximadamente igual a *k* veces la temperatura absoluta, sólo están ocupados los niveles más bajos de energía (*izquierda*). Por otro lado, cuando la separación sea menor que *kT*, también estarán ocupados los niveles superiores (*derecha*). En las ecuaciones, el símbolo *N(X)* denota el número de partículas que ocupan el nivel de energía *X*.

Entre las fuentes luminosas más intensas conocidas se encuentra el láser, cuyo fuerte haz monocromático y altamente colimado puede hacer llegar con gran velocidad fotones de la frecuencia correcta al escaso volumen que ocupa la muestra. De hecho, si no se hubiese dispuesto del láser de frecuencia regulable la espectroscopía de chorro supersónico hubiese resultado imposible, o como máximo una mera curiosidad aplicable sólo en algunos pocos casos favorables. El desarrollo de la espectroscopía de chorro supersónico como instrumento de utilidad general se produjo gracias, sobre todo, al desarrollo de láseres más potentes y fiables que pueden regularse para obtener fotones en las regiones del infrarojo al ultravioleta.

En nuestro sistema, el gas portador, que normalmente suele ser el helio, aunque en ocasiones sirve el argon, atraviesa el compuesto molecular de interés. De esta forma el gas portador recoge una pequeña cantidad de vapor molecular; la mezcla resultante se expande a través de una boquilla, un simple orificio de 0,05 milímetros de diámetro practicado en una delgada pieza de metal. Cuando a temperatura ambiente la presión del vapor no adquiere la intensidad necesaria, pueden calentarse la muestra molecular y la boquilla antes de hacer pasar el gas al interior de la cámara evacuada.

La sección mayor del aparato corresponde al sistema de bombeo necesario para mantener el vacío en el que se expande el gas libre. La temperatura final a lo largo del centro del chorro se rebajará prolongando el diámetro de la boquilla o aumentando la presión tras la misma, aunque estas dos modifica-

ciones elevan la cantidad de gas a evacuar por las bombas. De ahí que el tamaño del sistema de bombeo limite, en última instancia, la capacidad de enfriamiento del chorro. Nosotros hemos logrado una temperatura translacional final de unos 0,05 grados Kelvin, lo que enfría el movimiento rotacional molecular a unas pocas décimas de grado y el movimiento vibracional a un nivel de entre 10 y 50 grados. (La mayoría de las moléculas están en el estado electrónico fundamental, incluso a temperatura ambiente.)

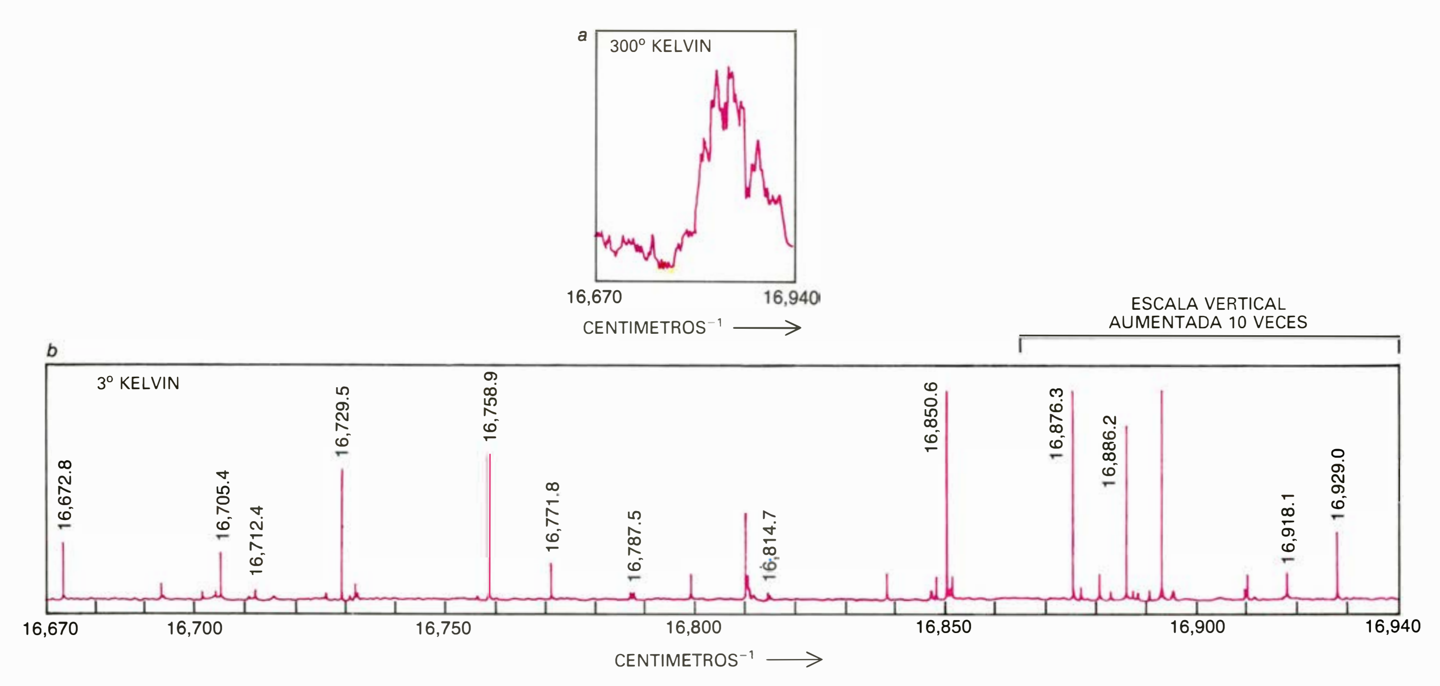
Para generar el espectro, se cruza en ángulo recto con el chorro libre supersónico un haz de luz láser visible o ultravioleta, cuya radiación puede variarse de frecuencia. Los fotones del láser tienen energía suficiente para elevar una significativa proporción de moléculas a un estado de energía electrónica excitado. El detector es un tubo de fotomultiplicador que transforma la señal del fotón en un impulso de corriente eléctrica. De tres formas podemos distinguir los fotones de fluorescencia de los emitidos por el láser. Primero, los fotones fluorescentes no tienen necesariamente la misma frecuencia que los fotones del láser. Si la molécula excitada electrónicamente no vuelve al mismo nivel de energía del que procedía, la frecuencia del fotón fluorescente no corresponde a la frecuencia del láser. Para tales frecuencias, un simple filtro de vidrio coloreado o un monocromador transmite los fotones de fluorescencia al tubo del fotomultiplicador bloqueando la luz del láser.

La segunda forma de distinguir los fotones de fluorescencia de los fotones del láser consiste en colocar el fotodetector fuera del recorrido del haz del láser. Al hallarse colimado dicho haz, los únicos fotones contados por el detector serán los fluorescentes, que se emiten en todas direcciones. En tercer lugar, a veces resulta viable filtrar temporalmente los fotones del láser. Si el láser se proyecta por pulsos, o se enciende y se apaga rápidamente, la molécula puede continuar emitiendo fotones fluorescentes algún tiempo después de apagado el láser. En este caso, los fotones pueden eliminarse si se mantiene apagado el fotodetector mientras el láser permanece encendido, pudiéndolo conectar cuando se apaga el láser y mientras la molécula todavía tiene fluorescencia.

La técnica de detección de la fluorescencia no agota todas las posibilidades de obtener el espectro a partir de un chorro supersónico de gas. Recientemente se ha desarrollado otro método que detecta eléctricamente partículas cargadas, en lugar de fotones. La molécula de la muestra se excita electrónicamente por absorción de un fotón del láser, primero. A continuación, se absorbe un segundo fotón procedente del mismo láser o de un segundo láser; basta la energía de un segundo fotón para ionizar una molécula, o restarle un electrón, pero sólo si el primer fotón ha colocado con antelación la molécula en un estado excitado. En este caso, por ser el ion molecular una partícula de carga positiva con un déficit de uno o más electrones, la presencia de una partícula cargada en la muestra constituye una señal de que originalmente la molécula había absorbido un fotón de frecuencia conocida cuando fue excitada electrónicamente por primera vez. Además, el detector de partículas cargadas puede incluir un espectrómetro de masas, lo que permite determinar la masa de la molécula absorbente.

La espectroscopía de chorro supersónico se ha aplicado al estudio de una amplia diversidad de moléculas, cuya complejidad va desde las diatómicas hasta las grandes moléculas orgánicas denominadas porfirinas. La primera molécula que investigamos con la técnica, el dióxido de nitrógeno (NO_2), proporciona una excelente demostración de la capacidad de la espectroscopía de chorro supersónico para resolver líneas espectrales densamente empaquetadas. El espectro electrónico del dióxido de nitrógeno se extiende desde el infrarrojo a casi todas las frecuencias visibles; las líneas densamente empaquetadas producen el color marrón del dióxido de nitrógeno que contamina la atmósfera de nuestras ciudades.

A menudo, las líneas espectrales se analizan agrupándolas en bandas que corresponden a muchos niveles de energía rotacional y a un solo nivel vi-



7. LA RESOLUCION DEL ESPECTRO del dióxido de nitrógeno mejora cuando dicho espectro se obtiene mediante un chorro sembrado de moléculas de dióxido de nitrógeno. La traza superior corresponde a un espectro generado por el dióxido de nitrógeno, gas estático; su complejidad impide el análisis. La traza inferior es la de un espectro de chorro libre supersónico en la misma región de frecuencias, representada con una escala de frecuencias extendida. En este caso, las diferentes líneas espectrales aparecen resueltas, lo que permite deducir la información pertinente sobre la estructura de esta molécula.

bracional. En muchas moléculas pequeñas, las bandas vibracionales aparecen nítidamente separadas; no así en el dióxido de nitrógeno, cuyas líneas espectrales, muy densas, se nos ofrecen juntas; razón por la cual el espectro se había resistido al análisis durante muchos años, a pesar de los intentos realizados. En un chorro libre supersónico, el dióxido de nitrógeno puede estar frío, hasta el punto de que todas las moléculas de la muestra ocupan los niveles de energía rotacional y vibracional más bajos. Cuando la molécula se excita electrónicamente, el espectro se compone de una línea rotacional para cada nivel vibracional del estado de energía excitada; la separación de las bandas resulta así fácil de interpretar. Comprobamos que valía la pena apartarse de las condiciones más extremas que podíamos alcanzar; inicialmente se poblaban unos pocos niveles de energía rotacional. De este modo, el espectro presentaba una mayor estructura rotacional y, por tanto, información adicional sobre la molécula.

El estudio de los procesos dinámicos de las moléculas, como la transferencia de energía y la descomposición por la luz, constituye una de las aplicaciones más prometedoras de la espectroscopía de chorro supersónico. Por nuestra parte nos hemos interesado en el flujo de energía en una molécula, de un modo vibracional a otro. En el estudio de tales fenómenos conviene disponer de un medio para detectar la transferencia de pequeñas cantidades de energía; si se dispone de tales medios, es posible estudiar la molécula cerca de su estado vibracional fundamental, en donde son bien conocidas tanto su estructura como sus propiedades. Este requisito lo cumple una clase de moléculas cuya estructura es mantenida por las débiles fuerzas intermoleculares conocidas por fuerzas de van der Waals. En estas moléculas, la transferencia de una pequeña cantidad de energía desde el modo vibracional hasta el enlace de van der Waals rompe el enlace, lo que significa que ha ocurrido una transferencia de energía. En las moléculas de van der Waals el umbral de energía necesario para romper el enlace y señalar la transferencia de energía es mucho menor que en las moléculas cohesionadas con enlaces químicos ordinarios; por ello cabe la posibilidad de investigar reacciones fotoquímicas con una energía de excitación extremadamente reducida.

Pero ocurre que la fuerza de van der Waals es demasiado débil para formar enlaces estables en las condiciones habituales del laboratorio. Ahora bien, a las bajas temperaturas que prevalecen en el chorro libre supersónico pueden establecerse enlaces de van der Waals entre determinadas moléculas, el iodo molecular (I_2), por ejemplo, y los átomos de un gas noble, así el helio o el neon. Si la absorción de un fotón excita a estas moléculas electrónica y ligeramente en el sentido vibracional, ambos átomos de iodo empiezan a oscilar en la dirección del enlace que los une. Después de un corto intervalo de tiempo, esta energía se transfiere al enlace de van der Waals, lo cual provoca la ruptura de dicho enlace y la producción de dos partículas: una molécula de iodo puede volver entonces a su estado electrónico inicial y emitir un fotón, señal de que la molécula de van der Waals había absorbido antes un fotón y se había producido una reacción fotoquímica.

La línea espectral registrada por el fotón absorbido aparece difuminada, o ensanchada, aunque dicho ensanchamiento en sí mismo es informativo, ya que partiendo de la amplitud de la línea puede calcularse la duración del estado excitado. El cálculo depende del principio de incertidumbre, que afirma que la exactitud con la que se conoce la duración del estado excitado tiene que quedar contrarrestada por la incertidumbre que acompaña a su energía. Ahora bien, la frecuencia, y por tanto la posición de la línea espectral, es proporcional a la energía del fotón; en consecuencia, el ensanchamiento de la línea refleja la incertidumbre respecto a su energía. La anchura de la línea indica el transcurso de varias decenas o centenares de picosegundos (billonésimas de segundo) antes de la transferencia de energía al enlace de van der Waals; por tanto, la vibración de los átomos de iodo ha de mantenerse a lo largo de centenares de oscilaciones.

Este tipo de estudios, que proporcionan una elevada resolución, tanto en el tiempo como en el espacio, están contribuyendo a convertir la espectroscopía de chorro supersónico en un método común para el estudio de los espectros de moléculas en fase gaseosa. Las principales limitaciones de la técnica residen en la intensidad y fiabilidad de la fuente de láser y en el grado en que es posible seleccionar una determinada frecuencia de emisión. El rápido desarrollo de la tecnología de láser hará probablemente de la espectroscopía de chorro supersónico una herramienta cada vez más potente.

Números y medidas en los primeros documentos escritos

Ya a finales del cuarto milenio a. C., protosumerios y protoelamitas poseían sistemas de números y medidas bien desarrollados, entre los que se contaba un antecedente de nuestro propio sistema decimal

Jöran Friberg

Entre los primeros documentos escritos del mundo se encuentran unas inscripciones sobre tablillas de arcilla exhumadas en Irak e Irán, en particular en los yacimientos de dos grandes ciudades antiguas: la primitiva ciudad sumeria de Uruk y la antigua ciudad elamita de Susa. Las inscripciones, en su mayor parte cuentas y recibos de distintos tipos, se escribieron hacia finales del cuarto milenio a. C. y poco después. Tras muchas décadas de labor estudiosa, han podido identificarse todos los sistemas de números y medidas de estos textos "protoletrados". En ellas hallamos los antecedentes del sistema numeral sexagesimal sumerobabilónico posterior (que cuenta de 10 en 10 y de 60 en 60) y de nuestro propio sistema decimal (que cuenta sólo de 10 en 10). Encierran, además, un sistema de medidas de capacidad, no reconocido con anterioridad, utilizado en todas las cuentas concernientes a cebada, que en esta temprana fecha constituía tanto el cereal alimentario básico como la moneda.

El lector que guste saber sobre los sistemas numeral y de medidas protoletrados tendrá que seguirme en un viaje de dos direcciones. Viajaremos hacia atrás en el tiempo, con respecto a la documentación histórica, y hacia adelante, desde el pasado hacia el presente, por lo que a los estudiosos que han investigado las tablillas antiguas respecta. La razón de que debamos hacerlo así estriba en que las tablillas más antiguas yacían enterradas a mayor profundidad y fueron, por tanto, las últimas en rescatarse y ser accesibles para su estudio. Las tablillas más antiguas eran también las de más difícil interpretación.

Tomemos por punto de partida la costera isla griega de Cos, a unos 32 kilómetros al noroeste de Rodas. Allí, hacia el 340 a. C., el fundador de una escuela de astrología, un babilonio llamado Beroso, escribió una historia de su tierra de origen. En dicha historia contaba a sus lectores griegos que los numerales *sossos* (60), *neros* (600) y *saros* (3600) ocupaban un lugar especial en la aritmética y astronomía babilónicas. Nada más se supo sobre numerales y medidas babilónicas en los siguientes 2200 años. En 1855, Sir Henry Rawlinson, uno de los pioneros del desciframiento de la escritura cuneiforme, publicó un resumen de los numerales cuneiformes inscritos en una pequeña tablilla de arcilla hallada en el yacimiento de la antigua ciudad mesopotámica de Larsa. Entre otras cosas, Rawlinson se dio cuenta de que las dos últimas líneas de la tablilla establecían en efecto que "58 1 es el cuadrado de 59" y que "1 es el cuadrado de 1". Concluyó que la tablilla era la parte final de una tabla de raíces cuadradas, que comenzaba con el cuadrado de 49 (igual a 2401, o $40 \times 60 + 1$) y finalizaba con el cuadrado de 60 (igual a 3600 o 60×60). Por supuesto que su interpretación sólo era posible si se suponía que los numerales 60 y 60×60 estaban ambos representados por el mismo símbolo, esto es, el del número 1.

Rawlinson sacó la conclusión de que los babilonios habían operado con una notación numérica sexagesimal de una naturaleza cuasiposicional; en otras palabras, una notación numérica en la que el símbolo para 1 representaba también las potencias de 60 y, el símbolo 10, 10 veces las potencias de 60. Llegó a la conclusión adicional de que los babilonios no tenían ningún signo especial para representar el cero.

Resulta necesario considerar aquí sucintamente los méritos relativos de los sistemas numerales de bases diferentes. Comencemos por el denominado sistema métrico, que es en realidad una familia de sistemas interrelacionados de unidades para varios tipos de medidas. El sistema métrico debe su aceptación general a su sencillez estructural y al hecho de que está construido para adecuarse a la base 10, o decimal, un sistema empleado hoy para todo tipo de cómputo ordinario. Desde su creación en Francia entre los productos de la Revolución Francesa, se ha difundido gradualmente por todo el mundo.

El propio lapso temporal que le ha costado al sistema métrico hacerse con una aceptación general constituye la prueba de cuán difícil resulta eliminar otros sistemas "consuetudinarios" de pesos y medidas. Los ejemplos ingleses de dichos sistemas incluyen las secuencias *mile, furlong, chain, rod, yard, foot* e *inch* (o las tradicionales castellanas de *milla, legua, braza, vara, pie* y *pulgada*) para las medidas de longitud, *barrel, bushel, peck, quart* y *pint* (*fanega, celemín, almud, cuartera* o *cuartillo*) para las medidas de áridos, y *ton, hundredweight, pound* y *ounce* (*tonelada, quintal, arroba, libra* y *onza*) para las medidas de peso. Por esta cuestión, incluso el sistema métrico, en su forma no científica, ha llegado a incorporar sistemas no decimales: el año de 12 meses, el día de 24 horas, la hora de 60 minutos, el minuto de 60 segundos, como unidades de tiempo, y la circunferencia de 360 grados, con sus subdivisiones de grado de 60 minutos y minuto de 60 segundos, como unidades de medición de ángulos. Estas medidas ordinarias pueden ser retrotraídas hasta la astronomía griega clásica y aún más allá, hasta el uso general de numerales sexagesimales para el cálculo en Babilonia y Sumeria. Muchos otros sistemas habituales de pesas y medidas estaban condenados, sin embargo, a ser susti-

tuidos por el sistema métrico decimal, debido a que no se adecuaban suficientemente al sistema numérico decimal adoptado de un modo general.

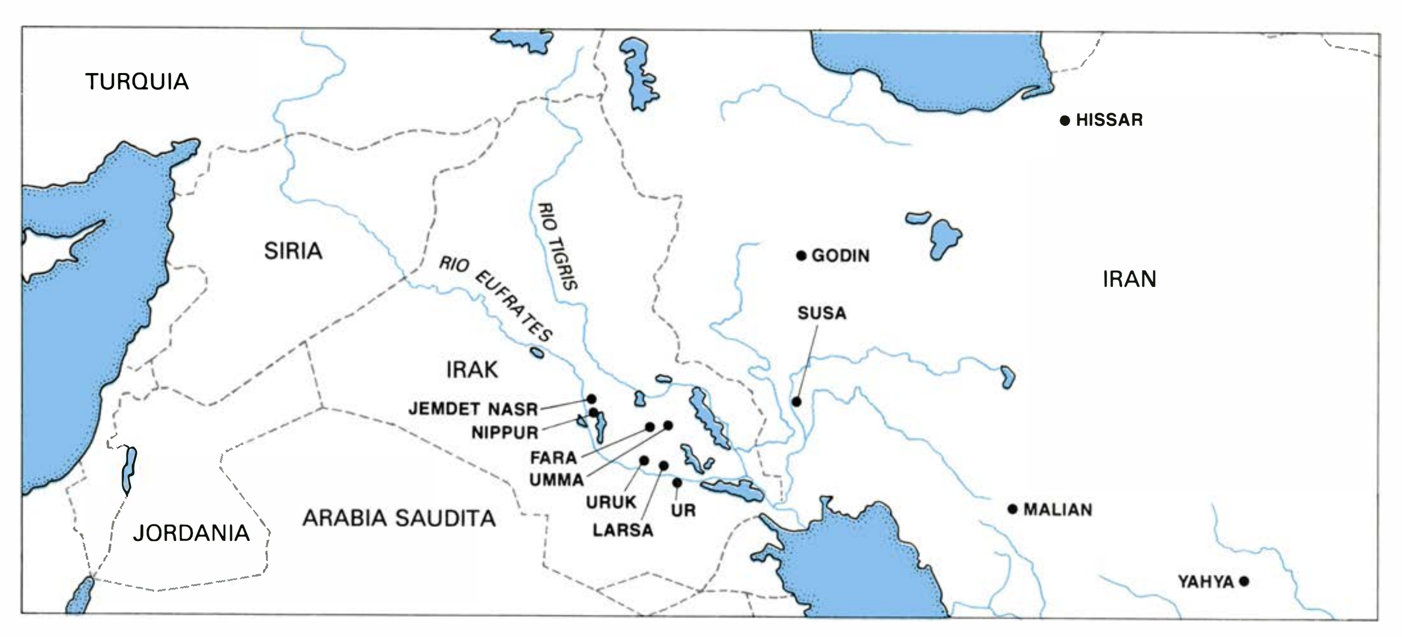
Con todo, la pervivencia de algunos sistemas ordinarios ha sido en parte responsabilidad del propio sistema numérico decimal. El sistema decimal encierra la debilidad de que su base de 10 es, en realidad, demasiado pequeña. Esto quedará más claro en cuanto aporte unos ejemplos adicionales de cálculos dentro del marco del sistema sexagesimal, con su base mayor: $60 = 3 \times 4 \times 5$ (en oposición a $10 = 2 \times 5$). Como se podrá ver, el sistema de base 60 permitió que los predecesores protoletrados de los sumerios construyeran una familia de sistemas métricos perfectamente relacionados entre sí, con secuencias de unidades canónicas de aparición natural de fácil manejo en los cálculos.

Hallar la interpretación correcta del sistema de notaciones cuneiformes que sirven para representar números sexagesimales (o de base 60), resultó relativamente fácil. Más difícil resultó entender cómo estaban construidos los distintos sistemas de medidas que aparecen en numerosas inscripciones cuneiformes. Algunas claves decisivas las ofrecieron ciertos tipos de tablillas que los estudiosos interpretan como textos escolares.

La copia de textos canónicos constituía parte esencial de la carrera escolar en la época del Babilónico Antiguo o Paleobabilónico (del 1900 al 1500 a. C.). Muchos de estos textos eran listas y tablas: listas de nombres geográficos, listas de nombres de aves y peces, listas de palabras en dos lenguas, tablas gramaticales para el estudio de la difícil lengua sumeria, etcétera. También se copiaban tablas matemáticas y tablas de medidas. Al hacer este tipo de



1. TABLILLA PROTOSUMERIA procedente de Jemdet Nasr, en el Irak, que recoge las raciones distribuidas a un total de 40 individuos en el curso de una semana de cinco días. Los signos del extremo izquierdo de las tres primeras líneas indican "día 1", "día 2" y "día 3". El texto del reverso de la tablilla indica que cada individuo recibía raciones equivalentes a dos unidades menores de cebada por día. La cebada constituía la moneda de la época. El signo triangular próximo al extremo derecho de la cuarta fila significa probablemente "obreros". La tablilla pertenece a la colección del Museo Británico.



2. IRAK E IRAN son las regiones del Asia sudoccidental donde surgen las primeras formas de escritura antes del 3000 a. C., en principio para registrar cifras y géneros. Los siete yacimientos del Irak han librado numerosas tablillas cuneiformes. Dos de éstos, Jemdet Nasr y Uruk, son los lugares de origen de las tablillas que encierran la escritura mesopotámica más antigua, la protosumeria. Los cinco yacimientos del Irán, Susa en particular, son los puntos de origen de una escritura sin parentescos lingüísticos, la protoelamita, tan antigua, poco más o menos, como la protosumeria. Ambas se basaban en notaciones especiales, idénticas en lo esencial, para representar cifras y medidas, lo que permite una cierta interpretación de las tablillas que las portan.

copia, un estudiante se formaba en la escritura cuneiforme y al mismo tiempo reunía una pequeña biblioteca personal de tablillas.

El primer ejemplo de una tabla de medidas descrito en una publicación científica fue una tablilla fragmentaria descubierta también en Larsa. La tabla fue investigada en 1872, por George Smith, notable estudioso del cuneiforme, pero su significado no se comprendió enteramente hasta mucho más tarde. En el lado izquierdo de cada columna de la tablilla hay una secuencia, dispuesta de un modo sistemático, de mediciones de longitud, expresadas en unidades al uso. Estas unidades son, de menor a mayor, el *she* (un grano), el *shu-si* (un dedo), el *kush* (un codo) y así sucesivamente hasta el *beru*, equivalente a $30 \times 60 \times 12$ (6×60^2), o 21.600 codos. En la parte derecha de cada columna aparecen las mismas mediciones de longitud expresadas en múltiplos de codos en notación sexagesimal. Por ejemplo, la línea de la parte inferior derecha identificada como *a* en la reproducción de una tablilla que aparece en la figura 4 reza "Dos *beru* [equivalen a] 12". Debería señalarse que *beru* representa la pronunciación babilónica del símbolo para la palabra sumeria *danna* (escrita normalmente como *kas-gid*, que significa "camino largo"). No obstante, el 12 no representa 12 codos, sino la suma mucho mayor de 12×60^2 codos. Con un codo que equivalga a medio metro de longitud aproximadamente, la longitud del *beru* era superior a los 10 kilómetros.

Cuando se identificó otro fragmento de la misma tablilla poco después de que se hallara el primero, se vio que contenía otra tabla metrológica del mismo tipo que la primera, excepto en que, en este caso, la parte derecha de cada columna tenía que ver con múltiplos de un *nindan* (equivalente a 12 codos) en la notación sexagesimal. Sólo mucho más tarde el estudio de los textos matemáticos babilónicos que atañen al cálculo de volúmenes puso de manifiesto que, mientras que el codo constituía la unidad básica para las medidas verticales, el *nindan* era la unidad para las mediciones horizontales. De aquí que la menor unidad de superficie sumerobabilónica, el *shar*, fuera un *nindan* cuadrado. Del mismo modo, la menor unidad de volumen, llamada también *shar*, era el espacio contenido por un área de base de un *nindan* cuadrado que tuviera lados de un codo de alto. Esta serie aparentemente peculiar de unidades era realmente bastante práctica, pues evitaba por lo general la necesidad de contar con fracciones menudas de una unidad de volumen.

Estas dos tablas metrológicas constituyen un testimonio elocuente de la perfección con la que el sistema de mediciones de longitud sumerobabilónico se adaptaba al sistema numérico sexagesimal. Considérense las reglas de conversión para las unidades del sistema métrico de longitud. Seis *she* equivalen a un *shu-si*, 30 *shu-si* equivalen a un *kush*, 12 *kush* equivalen a un *nindan*, 60 *nindan* equivalen a un *USH* y 30 *USH* equivalen a un *danna* (o *beru*). La información contenida en esta secuencia de reglas de conversión puede condensarse del siguiente modo: los "factores de conversión" para el sistema lineal babilónico son 6, 30, 12, 60 y 30. Véase que cada uno de dichos factores es también un factor numérico del sistema numeral sexagesimal. A modo de comparación, la secuencia anglosajona de la pulgada a la milla da los factores de conversión siguientes: 12, 3, 5½, 4, 10 y 8. Cualesquiera que sean los orígenes de los factores de este sistema ordinario, está claro que no se adaptan en modo alguno a nuestro sistema numérico decimal.

Las excavaciones de Mesopotamia no sólo han proporcionado textos de interés matemático, como los procedentes de Larsa, sino también "textos con problemas", que aún son más sustanciosos. Ya en 1900 el Museo Británico reproducía dos grandes tablillas del Babilónico Antiguo que presentaban problemas matemáticos variados. Su terminología matemática era difícil e inusual, y así pasaron unos 30 años antes de que se interpretaran la mayoría de los problemas y se entendieran plenamente. En la actualidad son accesibles para su estudio un gran número de textos con problemas matemáticos del Babilónico Antiguo. Sin embargo, extendernos en los mismos quedaría fuera del ámbito de esta exploración de sus orígenes. Pasemos por tanto a otros textos publicados a principios de siglo.

Entre 1889 y 1900, una expedición estadounidense llevó a cabo una impor-

tante excavación en Nippur, uno de los yacimientos más extensos e importantes de Mesopotamia. En 1906, Herman V. Hilprecht, de la Universidad de Pennsylvania, informó de algunos de los resultados de la expedición en un volumen que incluía reproducciones de varios textos matemáticos y metrológicos importantes del Babilónico Antiguo y un texto de problemas escrito en sumerio. (Sólo hace un año que pude mostrar que este texto de problemas contiene una serie de problemas geométricos tridimensionales resueltos mediante reducción a ecuaciones cúbicas y obtención de raíces cúbicas.)

Los textos metrológicos del Babilónico Antiguo publicados por Hilprecht incluían tablas de conversión sexagesimal para varios tipos de medidas y listas de medidas de menor a mayor. Puede suponerse que dichas listas servían para enseñar tanto la estructura de los sistemas de medidas sumerobabilónicos como la forma de los signos numerales y demás signos que pertenecían a cada sistema.

La publicación de Hilprecht demostró una semejanza palmaria entre las tablas del Babilónico Antiguo, de un lado, y vocabularios y listas léxicas o gramáticas sumerobabilónicas, del otro. Desde entonces se han exhumado un buen número de textos correspondientes a esas categorías. Los más antiguos de los mismos los constituyen unas pocas listas léxicas protoletradas que datan de finales del cuarto milenio a. C. Las tablas matemáticas más antiguas son medio milenio más recientes.

Si proseguimos ahora nuestro viaje hacia atrás en el tiempo, hasta los comienzos del tercer milenio a. C., llegamos al período sumerio conocido como Ur III (2050-1950 a. C.), que precedió inmediatamente al período del Babilónico Antiguo. Se conoce gran cantidad de textos de Ur III, en su mayoría de carácter administrativo o económico. En ellos se empleaba, como norma, una notación no posicional para los números sexagesimales, con signos independientes para 1, 60 y 60^2, para 10, 10×60, y 10×60^2, y así sucesivamente. Con este tipo de notación no posicional no había necesidad de un signo especial para el cero.

Solamente unos pocos de entre los numerosos textos de Ur III son de algún interés por su contenido matemático o metrológico. Mencionaré aquí precisamente un reducido grupo de éstos, que se ocupan de cálculos de la cantidad de simiente necesaria para sembrar campos de unas dimensiones dadas, cuando el espaciamiento de los surcos se daba como *N* surcos por *nindan*. Las copias conservadas de una especie de *Almanaque del Granjero* sumerio indican que se depositaban regularmente en el surco los granos a intervalos de dos dedos (*shu-si*), esto es, a razón de 180 granos (equivalentes a una unidad de capacidad denominada *shekel* [siclo]) por *nindan*. Cuando, como por lo general era el caso, *N* era igual a 10, esta razón podía expresarse justamente como un *gur* (la unidad mayor de capacidad) por *bur* (la unidad mayor de superficie). Este ejemplo, en el que un grano por dos dedos equivale a un siclo por *nindan* o a un *gur* por *bur*, muestra de qué modo las distintas unidades de medida sumerobabilónicas aparecían perfectamente interrelacionadas a pesar de su aparente complejidad.

El dominio sumerio en Mesopotamia durante el tercer milenio se rompió por un breve interludio semítico, que comienza con el reinado de Sargón de Acad (2350-2300 a. C.). La existencia de una actividad matemática en el período de Sargón y de sus sucesores, que difícilmente puede ponerse en tela de juicio, aparece confirmada por un puñado de pequeñas tablillas que registran ejercicios geométricos sencillos, pero en modo alguno triviales. El período sargónico es ilustrado aquí con una tablilla procedente de la ciudad de Umma y que presenta una cuenta de ofrendas religiosas, diarias y mensuales de cerveza. Su texto incluye interesan-



40 01 E 49 IBSI
40 × 60 + 1 (2401) IGUAL A 49 AL CUADRADO

41 40 E 50 IBSI
40 × 60 + 40 (2500) IGUAL A 50 AL CUADRADO

58 01 E 59 IBSI
58 × 60 + 1 (3481) IGUAL A 59 AL CUADRADO

1 00 00 E 1 00 IBSI
60 × 60 (3600) IGUAL A 60 AL CUADRADO

3. TABLILLA CUNEIFORME DE LARSA descrita en 1855 por Sir Henry Rawlinson, que aparece reproducida parcialmente. La escritura es cuneiforme del Babilónico Antiguo; el texto es una tabla de raíces cuadradas. Junto a las dos líneas superiores e inferiores hay transliteraciones alfabéticas y a números arábigos (*negro*). Bajo las transliteraciones pueden encontrarse traducciones libres (*color*). Muchas de estas tablillas eran meras copias de estudio.

tes cálculos metrológicos. Muestra asimismo con claridad que los símbolos numéricos podían escribirse en dos formas: como signos cuneiformes, inscritos con el extremo en forma de cuña de un cálamo, o como signos circulares realizados con el extremo romo del mismo.

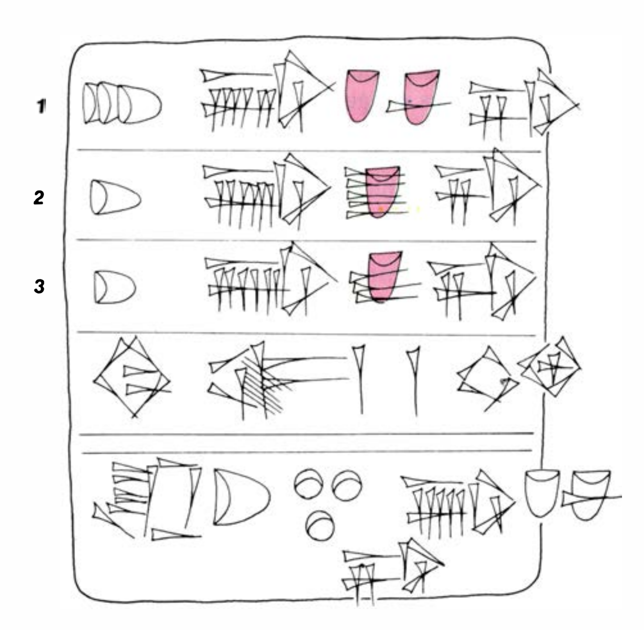
Pocos textos matemáticos más se conocen del período sumerio presargónico y del precedente período de Fara, el Sumerio Antiguo o Paleosumerio, de mediados del tercer milenio a. C. El texto metrológico más antiguo que se conoce es del período de Fara, y enumera las áreas de grandes campos cuadrados hasta incluir un campo de $(10 \times 60$ *nindan*$)^2$. Recientemente he tenido la oportunidad de identificar otro texto de Fara como un ejercicio geométrico relacionado con el anterior. Otros dos textos matemáticos del período de Fara son bien conocidos. Ambos tratan del mismo problema de división con grandes cifras sexagesimales en juego. Aunque esta pequeña muestra de textos no permite alcanzar conclusiones trascendentales, parece claro que los primitivos maestros sumerios, cuya tarea parece haber sido la instrucción en lo que podría denominarse matemáticas elementales aplicadas, sobresalían realmente en la operación con problemas bastante abstractos que encerraban números o medidas muy elevadas o reducidas, con algoritmos para la multiplicación o la división, con cálculos de superficies basados en tablas de áreas cuadradas y otras cuestiones por el estilo. Como podremos ver, esta predilección por operar con cifras grandes y menudas imaginarias puede retrotraerse hasta el período protoletrado.

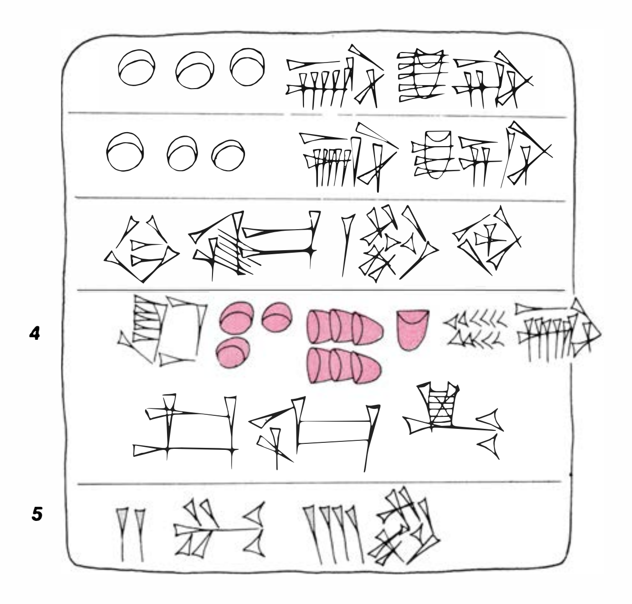
¿Cómo se desarrollaron los sistemas matemático y metrológico sumerios? La presentación de los datos principales entraña otro paso hacia atrás, hacia los comienzos del tercer milenio a. C. En 1928, Stephen H. Langdon, de la Universidad de Oxford, publicó una colección de unos 200 textos que habían sido excavados unos pocos años antes en el pequeño yacimiento de Jemdet Nasr, en el Irak. (La colección de Jemdet Nasr está en la actualidad dividida entre el Museo de Ashmole de Oxford y el Museo Iraquí de Bagdad.) Las nuevas inscripciones estaban escritas en una escritura pictográfica arcaica, claro antecedente de la cuneiforme sumeria. No obstante, muchos de los signos de estos textos arcaicos ya no se utilizaban en la época en que se concibieron los textos cuneiformes del período de Fara, del Sumerio Antiguo. Por dicha razón aún hoy no se conoce la lectura correcta de muchos signos de las inscripciones "protosumerias" de Jemdet Nasr y los textos siguen siendo más o menos ininteligibles. Tampoco está totalmente claro que la lengua de las tablillas de Jemdet Nasr sea sumerio, por lo que precisamente hago referencia a las mismas como protosumerias. Sin embargo, los números que aparecen en dichos textos, realizados normalmente con el extremo redondeado de los estilos, son siempre de fácil identificación. Se reconoció de inmediato que las notaciones numéricas de las tablillas de Jemdet Nasr presentaban una íntima relación con los de otras tablillas aún más enigmáticas procedentes del Irán. Estas tablillas se denominan, por razones similares, protoelamitas, y son más o menos de idéntica fecha. Volveremos sobre ellas más adelante.

En 1936, menos de una década después de la publicación de las tablillas de Jemdet Nasr por Langdon, el estudioso alemán Adam Falkenstein publicó otra colección de tablillas protosumerias, claramente más antiguas y en cierto modo más primitivas que las de Jemdet Nasr. La colección de Falkenstein incluía 600 inscripciones, pero éstas representaban solamente una pequeña parte del total recuperado por una expedición alemana que había excavado en el yacimiento de la importante ciudad mesopotámica de Uruk, en los primeros años de la década de 1930. La mayor parte de las tablillas publicadas procedían del Nivel IV de dicho yacimiento. El resto de la colección (ahora en Berlín) se publicará en un futuro cercano.

Tres textos de Jemdet Nasr que tratan de cálculos de superficies fueron interpretados en 1930 por el estudioso francés François-Maurice Allotte de la Fuÿe, quien demostró que el sistema numeral sexagesimal y el sistema sumerio de medidas de superficie se empleaban también en estas inscripciones pro-

4. OTRA TABLILLA DE LARSA, parte de una tabla de conversión para mediciones de longitud, constituía probablemente un ejercicio práctico de un aprendiz de escriba. A la derecha, desde la parte superior hasta la fila décima, hay una sola columna de cifras del 2 al 12 (*color*), con la omisión del 7. La última línea intacta (*a*) reza, de izquierda a derecha: "Dos *beru* [equivalen a] 12". Dado que en la escritura del Babilónico Antiguo los números 12, 12×60 y 12×60^2 se escribían todos de la misma manera, lo que se quiere decir en realidad es que dos *beru* equivalen a la distancia de 43.200 codos (12×60^2 codos).





5. OFRENDAS RELIGIOSAS DE CERVEZA aparecen registradas en el anverso (*izquierda*) y reverso (*derecha*) de esta tablilla del período sargónico procedente de Umma, en el Irak. Los signos de la izquierda, en las tres líneas superiores del anverso, indican, respectivamente, tres jarras de cerveza, una jarra y una jarra. Los símbolos coloreados de la derecha, en la primera línea, son unidades de capacidad, de izquierda a derecha, una *bariga* y un *ban* (seis *ban* hacen una *bariga*). La unidad que está debajo representa cinco *ban* y, la que queda debajo de ésta, representa tres *ban*. El sentido de las tres líneas es que ha de hacerse una ofrenda de cerveza diaria consistente en tres jarras de un *ban* con un valor en cebada de una *bariga*, y un *ban* de una jarra con un valor de cinco *ban* y en una jarra adicional valorada en sólo tres *ban*. La línea ancha (*4*) del reverso sumariza el valor total de la ofrenda durante un mes de 30 días: de izquierda a derecha (*color*) 3 veces 10 *gur* más 6 *gur* más 1 *bariga* (cuatro *bariga* equivalen a un *gur*). En *5* se registra la fecha: año 2, mes 4.

tosumerias. Con esta excepción, no obstante, las notaciones protosumerias para números y medidas continuaron comprendiéndose poco. Se suponía por lo general, empero, que, junto al sistema sexagesimal sumerio, los escribas primitivos recurrían a un sistema numeral decimal (o "centesimal"), tomado en préstamo posiblemente del protoelamita. Se suponía igualmente, por razones poco fundadas, que en los textos cerealísticos protosumerios (caracterizados por el signo *she*, que significa grano) la principal unidad de capacidad era un *gur* que contenía 300 *sila* (o 30 *ban*), al igual que en los textos de carácter cerealístico del período bien posterior de Ur III.

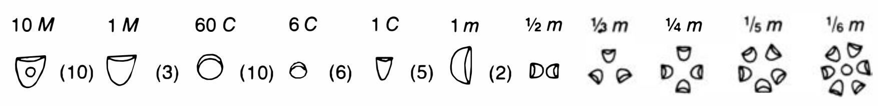
En 1978 pude demostrar la falsedad de dichas suposiciones al probar que en ambos tipos de textos cerealísticos protoletrados, protosumerios y protoelamitas, el signo numérico leído invariablemente por los estudiosos como 10 muy probablemente tuviera también el valor de 6. En efecto, incluso en un mismo texto el mismo signo numérico puede leerse como 10 o como 6, según el contexto.

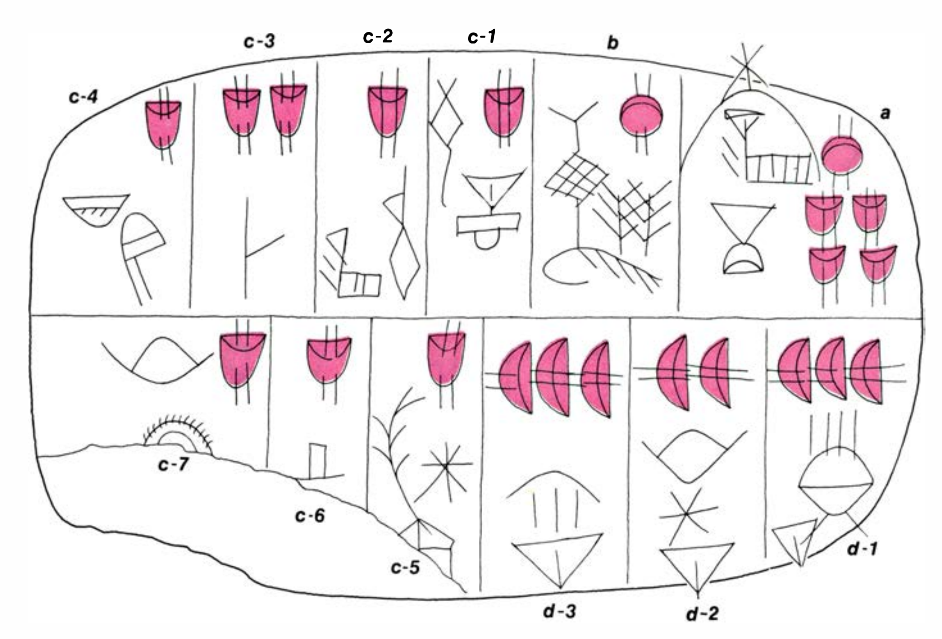
Esta nueva perspectiva posibilitó de inmediato la comprensión de los cálculos de cientos de textos con medidas de capacidad protosumerios y protoelamitas, textos que no había sido posible analizar anteriormente. Al establecer paralelos entre determinadas clases de textos protoletrados y sus correlatos sumerios pude determinar, además, al menos de una forma aproximada, el valor absoluto de la principal unidad de capacidad protoletrada, que resultó ser poco más o menos un *ban* sumerio (aproximadamente 10 litros) y no el pretendido 30 *ban*.

Gracias a estos progresos, pueden en la actualidad comenzar a determinarse correctamente la escala y carácter de las economías protosumerias de Jemdet Nasr y de Uruk, y de la economía protoelamita de Susa, importante ciudad antigua iraní. Cierto texto de "pan y cerveza", perteneciente al período de Jemdet Nasr, pero hallado en Uruk, que contiene cálculos con cifras elevadas y pequeñas fracciones, ha resultado ser de un interés particular. El texto carece de cualquier tipo de fecha o firma. Este solo hecho sugiere que no se trata de un registro administrativo corriente, sino de un texto escolar: un ejercicio de matemáticas y metrología. Como se indica en la figura 7, la parte superior de la tablilla aparece destinada al cálculo de la cantidad de grano librado para la cocción de cantidades determinadas de hogazas de pan de distintos tamaños (indicadas con fracciones de una unidad de capacidad menor protosumeria). La parte inferior de la tablilla refleja un cálculo similar de la cantidad de grano librado para la elaboración de dos jarras de cerveza fuerte, tres jarras de cerveza de grado medio y cinco jarras de cerveza ligera. Las diferentes gradaciones de los tres lotes de cerveza quedan manifestadas por las diferentes cantidades de grano por jarra de los tres ejemplos.

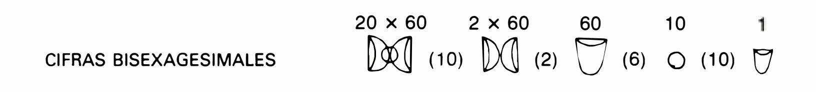
Este preciso ejemplo de un texto protosumerio del tipo de Jemdet Nasr es importante por varias razones. En primer lugar, establece sin lugar a dudas los valores *relativos* de algunas unidades del sistema protosumerio que servían para medir la capacidad, incluido cierto número de unidades fraccionarias. En segundo lugar, demuestra el uso tanto del sistema numérico sexagesimal como de un sistema especial "bisexagesimal". Igualmente importante, dicho texto puede emplearse para hallar los valores *absolutos* de las unidades de este sistema arcaico de medición de la capacidad.

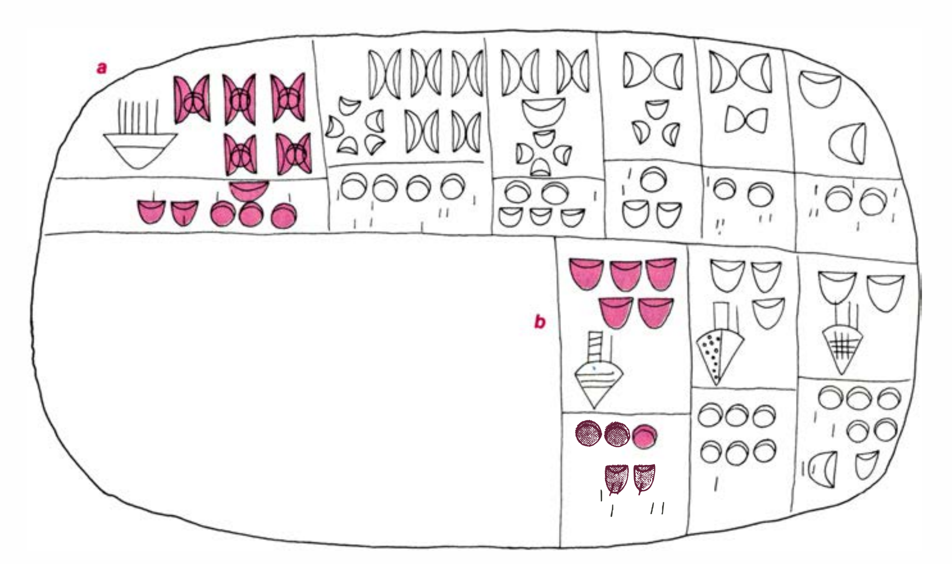
Volvamos ahora a la segunda clase de inscripción protoletrada, los textos protoelamitas procedentes de distintos yacimientos del Irán. Elam era el nombre dado por los babilonios y los asirios a la región occidental del Irán que se extiende hasta los confines de Mesopotamia. Las expediciones francesas han venido excavando en el yacimiento de la antigua Susa, la capital del Elam, desde finales del siglo XIX. En la época del período del Babilónico Antiguo, hace unos 4000 años, los elamitas utilizaban el sistema de escritura cuneiforme sumerobabilónico. Las excavaciones de Susa y de otros lugares del Irán han revelado, no obstante, la existencia de una civilización iraní anterior que utilizaba una escritura no cuneiforme y





6. TEXTO PROTOSUMERIO DE URUK que recoge la cantidad de trigo sarraceno distribuido entre cierto número de hombres y mujeres. El sistema de notaciones de capacidad en textos arcaicos como éste procede de una unidad mayor (*M* en el diagrama de factores que encabeza el texto), a través de una unidad principal (*C*), hasta una unidad menor (*m*) y las fracciones de una unidad menor. Las líneas dobles que aparecen con las unidades de medida indican que el cereal es trigo sarraceno. (Un otro símbolo, una espiga de cereal, representa la cebada.) El texto se lee de derecha a izquierda y los números aparecen en color. Dos supervisores, *a* y *b*, respectivamente, reciben 10 (escrito como 1 × 6 *C* + 4 × 1 *C*) y 6 *C*. Seis de los siete hombres (*c*-1, *c*-2, *c*-4, *c*-5, *c*-6 y *c*-7) reciben sendos 1 *C*; otro (*c*-3) recibe 2 *C*. Tres mujeres (*d*-1, *d*-2 y *d*-3) obtienen 3 *m*, 2 *m* y 3 *m*, respectivamente, la mitad de lo que corresponde a los hombres.





7. ESTE OTRO TEXTO PROTOSUMERIO sobre cantidades de pan y cerveza utiliza un sistema numérico "bisexagesimal" que aparece en el diagrama que encabeza el texto. El número mayor es 20 × 60; el menor es 1. Los compartimentos más a la izquierda de la fila superior (*a*) establecen que 6000 hogazas de pan (valoradas cada una en una unidad menor fraccionaria de cebada) tendrían un costo total de 1 *M* + 3 × 6 *C* + 2 (equivalente a 200 *C*). Los compartimentos más a la izquierda de la segunda fila (*b*) establecen que 5 (× 60, se entiende) jarras de cerveza tendrían un costo de 3 × 6*C* + 2*C* o 20 jarras por *C*. Por tanto, 30 hogazas de pan de tipo (*a*) o 15 jarras de cerveza de tipo (*b*) costaban 1*C* de cebada.

que floreció por un breve lapso un milenio antes de la época de los babilonios antiguos y de los elamitas. Esta civilización protoelamita fue lo bastante pujante para llevar su influjo fuera del Elam mismo, hacia el norte y el este, hasta rincones alejados de la meseta iraní.

Cientos de tablillas de arcilla arcaicas procedentes de Susa (que constituyen la mayor parte de todos los textos protoelamitas conocidos) fueron publicadas por el estudioso galo Vincent Scheil entre los años 1900 y 1935. Scheil fue también el primer estudioso que percibió un paralelismo entre las escrituras sumeria y protoelamita: el método de presentación de las notaciones numéricas. Sin embargo, la escritura protoelamita no presenta por lo demás relación alguna con cualquier otra escritura conocida. Su repertorio de signos, que representan las palabras o sílabas de una lengua desconocida, es de poca ayuda al ser abstracto, y no pictográfico, circunstancia esta que podría parecer que hace la interpretación de las partes no numéricas de los textos protoelamitas virtualmente imposible.

Los primeros intentos de Scheil por entender la naturaleza de los sistemas numerales de sus textos protoelamitas no fueron, desgraciadamente, afortunados. Fue incapaz de reconocer que un solo signo –una pequeña impresión circular– no tiene siempre necesariamente el valor numérico de 10. De este modo llegó por cierto tiempo a la conclusión de que los protoelamitas, al igual que los egipcios antiguos, operaban con un sistema numérico decimal en todas sus cuentas y cálculos. Más tarde, empero, encontró que algunos textos protoelamitas presentan un signo especial para 60. También identificó Scheil una serie de notaciones fraccionarias y llegó a identificar correctamente el logograma protoelamita para "grano" o quizá "medida de áridos".

Un texto protoelamina con un ejercicio matemático-metrológico, publicado por Scheil en 1935, trata de la suma de una larga serie de cifras de muchos dígitos que representan medidas de capacidad. Este texto particular proporciona una confirmación excelente de mi propio análisis de la estructura de las unidades protoelamitas para medir la capacidad. El sistema estaba construido claramente para adecuarse al sistema numérico sexagesimal (o bisexagesimal); posee la siguiente secuencia de factores de conversión de una unidad a la siguiente: 6, 10, 3, 10, 6, 5, 2, 3, 2, 2. La serie correspondiente de factores de conversión para las unidades del siste-

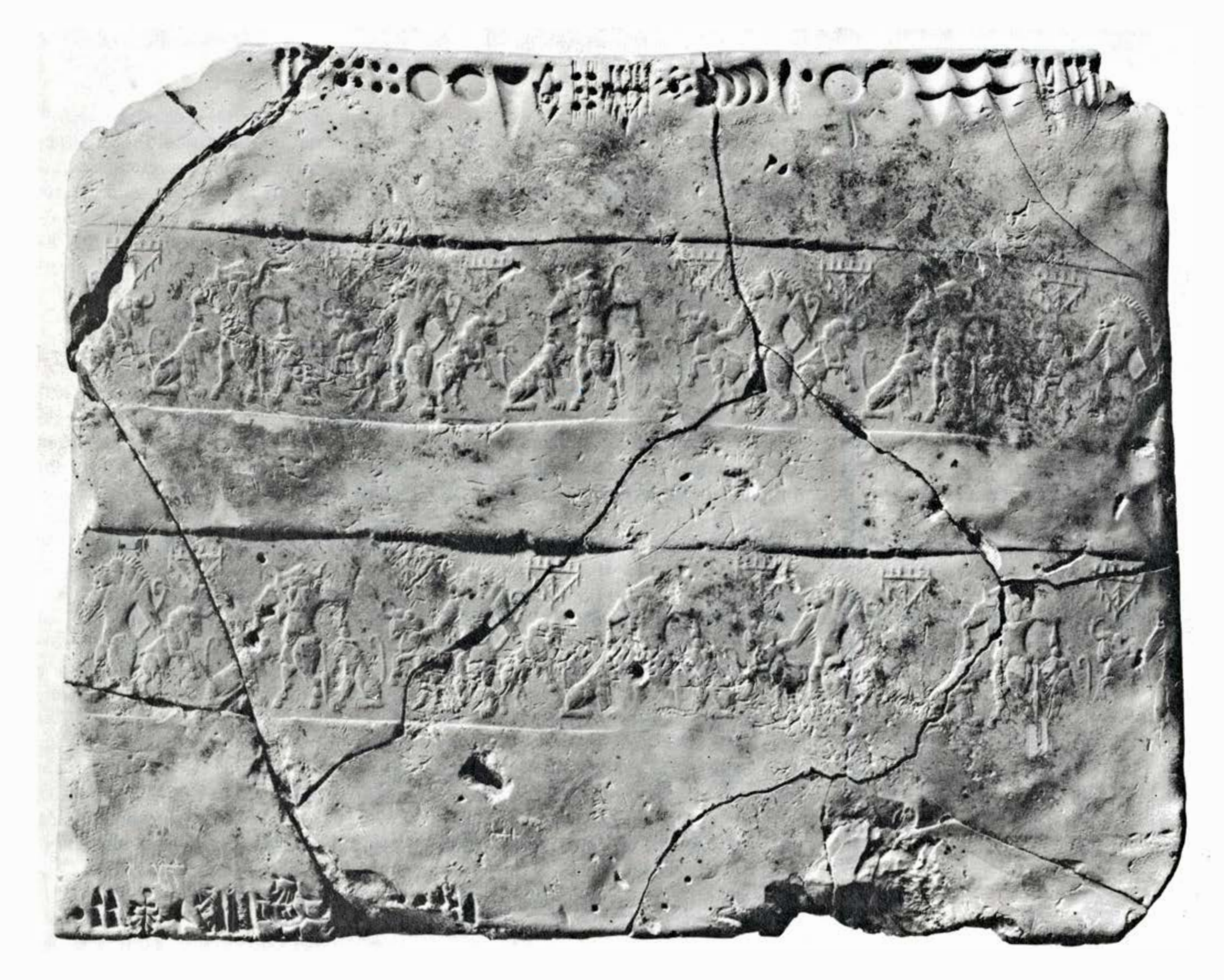
ma protosumerio, omitiendo los factores primero y cuatro últimos, es 10, 3, 10, 6, 5. De aquí que los dos sistemas difieran entre sí sólo en sus respectivos modos de representar las fracciones de la unidad de capacidad pequeña (una medida que se corresponde con el litro del sistema métrico).

Redacté un informe de este análisis de unidades de medidas de capacidad de los dos sistemas en una memoria de investigación de 1978. Esta misma memoria incluía otro descubrimiento sorprendente, a saber, que los protoelamitas (pero no los protosumerios) empleaban el sistema numérico sexagesimal sólo cuando contaban gente u objetos inanimados, como hogazas de pan o vasijas de cerámica. ¡Cuando contaban animales operaban con un sistema numérico decimal con notaciones numerales especiales! (En la escritura cuneiforme sumero-babilónica se empleaban ocasionalmente números decimales, pero, a falta de la notación adecuada, se representaban siempre por signos fonéticos.)

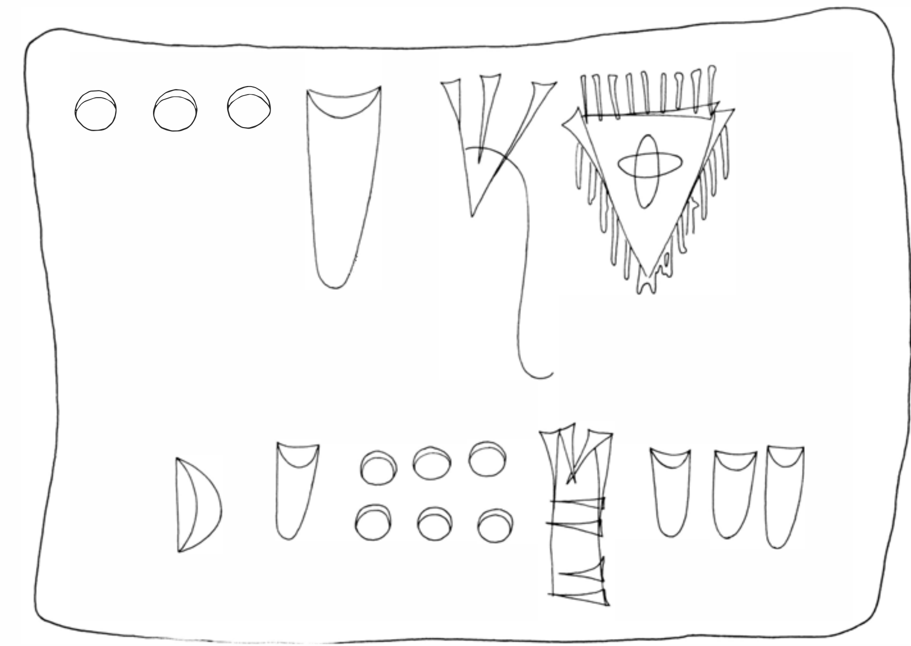
El empleo del sistema decimal para contar animales está confirmado por un famoso texto protoelamita publicado por Scheil en 1923. El texto es bastante peculiar: incluye pictogramas inequívocos, en vez de los oscuros logogramas acostumbrados. Se representan en cuatro categorías diferentes las cabezas de animales equinos, probablemente divididas según el sexo y la edad. No existe duda alguna, sin embargo, de que los "caballos" se contaban con números decimales.

Cabe añadir a la confusión general que resulta del empleo protoelamita de dos sistemas numéricos diferentes para los cómputos, que varios de los signos protoelamitas para números (no sólo la menuda e infame impresión circular) poseen valores diferentes según el contexto. Por ejemplo, el signo para 1000 es el mismo que el de 2 × 60. El motivo de esa ambigüedad de los signos numerales es obvio: con los extremos romos de uno o dos cálamos no pueden escribirse más que unos pocos signos.

En resumen, como resultado de mi identificación de los sistemas empleados en los textos protoletrados para números y medidas, pueden por primera vez dividirse los arcaicos textos protosumerios y protoelamitas de modo que entren en un número relativamente reducido de categorías según su contenido. El contenido de un texto está indicado en particular por el tipo de números y medidas empleados en el mismo. Por ejemplo, entre los textos protoelamitas, las principales categorías son las enumeraciones de gente (cómputo sexagesimal), cálculos de cereal librado en raciones para gente (números de capacidad y números sexagesimales) o para animales (números de



8. TABLILLA PROTOELAMITA DE SUSA que sólo muestra líneas de signos numéricos en sus bordes superior e inferior. La mayor parte de la restante superficie de esta cara aparece marcada por la estampación de un cilindro-sello que presenta unos leones que domeñan unos toros y viceversa. Los signos de la parte superior derecha de la tablilla totalizan numerosas partidas del reverso de la misma: poco más de 1200 unidades principales de capacidad. A la izquierda aparece una cifra más menuda, unas 360 unidades principales. Probablemente se trate de un impuesto que grave dicha transacción.



9. ESTE REGISTRO DE RACIONES DE CEREAL procedente de Susa se lee de derecha a izquierda. El texto comienza con un "triángulo peludo", considerado como la autoridad distribuidora. Después aparece un signo de "arado"; probablemente se trate de un obrero agrícola. Los signos numéricos que siguen continúan a la derecha de la línea inferior: 1 × 60 + 3 × 10 + 3. Viene luego un signo parecido a una gavilla de cereal; significa cebada. Por último se lee una cifra de capacidad: 6 × 6*C* + 1*C* + 1*m*. El sentido es que 93 obreros reciben, cada cual, dos unidades menores. (Los dibujos son de A. Iselin.)

capacidad y números decimales), textos de pan y cerveza (números de capacidad y números sexagesimales), cuentas de grupos de animales (números decimales), cuentas de hogazas de pan o vasijas cerámicas (números sexagesimales) y cuentas de grandes cantidades de cereal libradas de- o enviadas a- los almacenes, en un caso durante una "semana" de cinco días (número de capacidad). Pueden encontrarse otras categorías en los textos protosumerios: cálculos de superficies (números de superficie y números sexagesimales) y en un único ejemplo de un texto de sementera (números de superficie y números de capacidad).

Queda mucho por hacer hasta que las colecciones de textos protoletrados, publicados o sin publicar aún, nos ofrezcan toda la información que encierran. Sin embargo, se han realizado tantos avances, en particular en la última década, que ya puede bosquejarse un esquema plausible del desarrollo de la numeración y la metrología en el Asia sudoccidental desde la época prehistórica hasta la babilónica tardía.

En particular se sabe en la actualidad, gracias a la obra de Denise Schmandt-Besserat, de la Universidad de Texas en Austin, que una variedad de "fichas" de arcilla sirvieron en dicha región, desde el milenio noveno a. C. hasta finales del cuarto, para designar números, medidas y quizá categorías de objetos. También se sabe que el empleo de fichas sueltas se complementó, a finales del cuarto milenio, con el recurso de incluir símbolos escogidos en una especie de sobres protectores de arcilla. Los sobres parecen haber inspirado a su vez la invención de las "tablillas impresas" (el término hace referencia a tablillas de arcilla con notaciones numéricas y normalmente improntas de cilindros-sello, pero carentes de todo signo abstracto o logograma).

La similitud de la forma de los signos numéricos de las tablillas impresas y la forma de las fichas de arcilla anteriores muestra una continuidad de las representaciones de números y medidas desde la época del nacimiento de las ciudades-estado en el Asia sudoccidental hasta, remontándonos en el tiempo, el Neolítico Temprano, hace 10.000 años. Además, el hecho de que las notaciones para unidades que pertenecen a los distintos sistemas de números y medidas protoletrados aparezcan también con claridad en algunas tablillas impresas muestra una continuidad en las representaciones de los números y medidas desde finales del cuarto milenio a. C. en adelante, sin solución de continuidad, hasta el período del Babilónico Antiguo, que se sitúa unos 2000 años más tarde. Y, como hemos visto, nuestro propio sistema decimal, así como nuestra forma de dividir el tiempo en horas, minutos y segundos, es un reflejo de esa misma continuidad hasta el día de hoy.

Abejas solitarias

La mayoría de especies de abejas no son sociales, sino solitarias: la hembra construye el nido por sus propios medios. Desempeñan un papel decisivo en la polinización de plantas cultivadas y silvestres

Suzanne W. T. Batra

La colmena y la intrincada organización social de las abejas melíferas que la habitan constituyen, para la mayoría de las personas, la característica distintiva de la vida de las abejas. La verdad es otra: más del 85 por ciento de las aproximadamente 20.000 especies de abejas no son sociales, sino solitarias. Las hembras han de valerse de sus propios medios para hallar un macho con quien aparearse, construir un nido con unas 10 celdillas de incubación, aprovisionarlas con alimento para las crías y depositar un huevo en cada una de ellas; mueren antes de que surja la siguiente generación. Las abejas solitarias desempeñan papeles primerísimos en los sistemas ecológicos, en particular en la polinización de plantas cultivadas y silvestres. De hecho, en algunas partes del mundo los agricultores empiezan a tomar medidas encaminadas a acomodar abejas solitarias para la polinización de las plantas de cultivo que, como la alfalfa, no polinizan adecuadamente las abejas melíferas.

Según parece, las abejas evolucionaron a partir de antepasados depredadores, como las avispas del barro y otras avispas solitarias, hacia mediados del período Cretácico (hace 100 millones de años), cuando las plantas con flores se convirtieron en la vegetación dominante en la Tierra. En la actualidad las abejas viven por doquier, si bien presentan la mayor abundancia y diversidad de especies en climas semiáridos y templados cálidos. El aspecto general de muchas abejas solitarias no se asemeja tanto al de las abejas colmeneras cuanto al de avispas, moscas o abejorros. Su longitud oscila de 1,5 a 46 milímetros. Algunas especies carecen de pelos y son brillantes; otras son muy velludas. Aunque muchas presentan un aspecto deslustrado, las hay bellísimas, como las abejas de las orquídeas verde esmeralda. En el pelo o las manchas y bandas brillan todos los colores del arco iris.

Las abejas solitarias se reparten en nueve familias: Colétidos, o abejas de membrana, más numerosas y diversas en el hemisferio sur; Andrénidos, o abejas minadoras, que se encuentran sobre todo en el hemisferio norte; Halíctidos, o abejas del sudor (así llamadas porque les atrae el sudor humano), de distribución mundial; Megaquílidos, o abejas cortadoras de hojas y abejas albañil, de distribución asimismo mundial; Antofóridos, o abejas carpinteras y abejas mineras, predominantemente tropicales; Melítidos, Oxeidos y Fideliídos, pequeñas familias de distribución limitada y que carecen de nombre vulgar, y los Apidos, donde se encuadran las abejas melíferas, las abejas inermes y las abejas de las orquídeas, todas las cuales son principalmente tropicales, y los abejorros, que medran sobre todo en el hemisferio norte y forman el grupo más capacitado para tolerar temperaturas bajas.

Los nidos y las celdillas de incubación de la mayoría de abejas solitarias se construyen bajo tierra, preferentemente en el suelo desnudo, seco y suelto que queda expuesto al sol de la mañana. En tales hábitats menudean también nidos de parientes de las abejas: las hormigas y las avispas solitarias. En una zona favorable pueden formarse densas congregaciones de miles de nidos de abejas solitarias de hábitos terrestres. Sin embargo, las hembras no cooperan en las tareas de construcción del nido.

La mayor congregación de nidos que se conozca ocupaba unos 360.000 metros cuadrados de una orilla del río Barysh, en la Unión Soviética; se extendía siete kilómetros a lo largo del margen. La componían unos 12 millones de nidos, preparados por dos especies de halíctidos y una especie de abeja minera. Cada año, mediado mayo, recibo en mi despacho del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en Beltsville, Maryland, numerosas llamadas telefónicas de personas asustadas por los enjambres de abejas solitarias que anidan en los céspedes de la zona de Washington. Suele tratarse de la abeja de membrana *Colletes thoracicus*, cuya vida adulta activa dura unas seis semanas. La mayor congregación de este insecto del tamaño de una abeja melífera, que alcanzó los 104.000 nidos, se reunió en un solar suburbano de 1187 metros cuadrados.

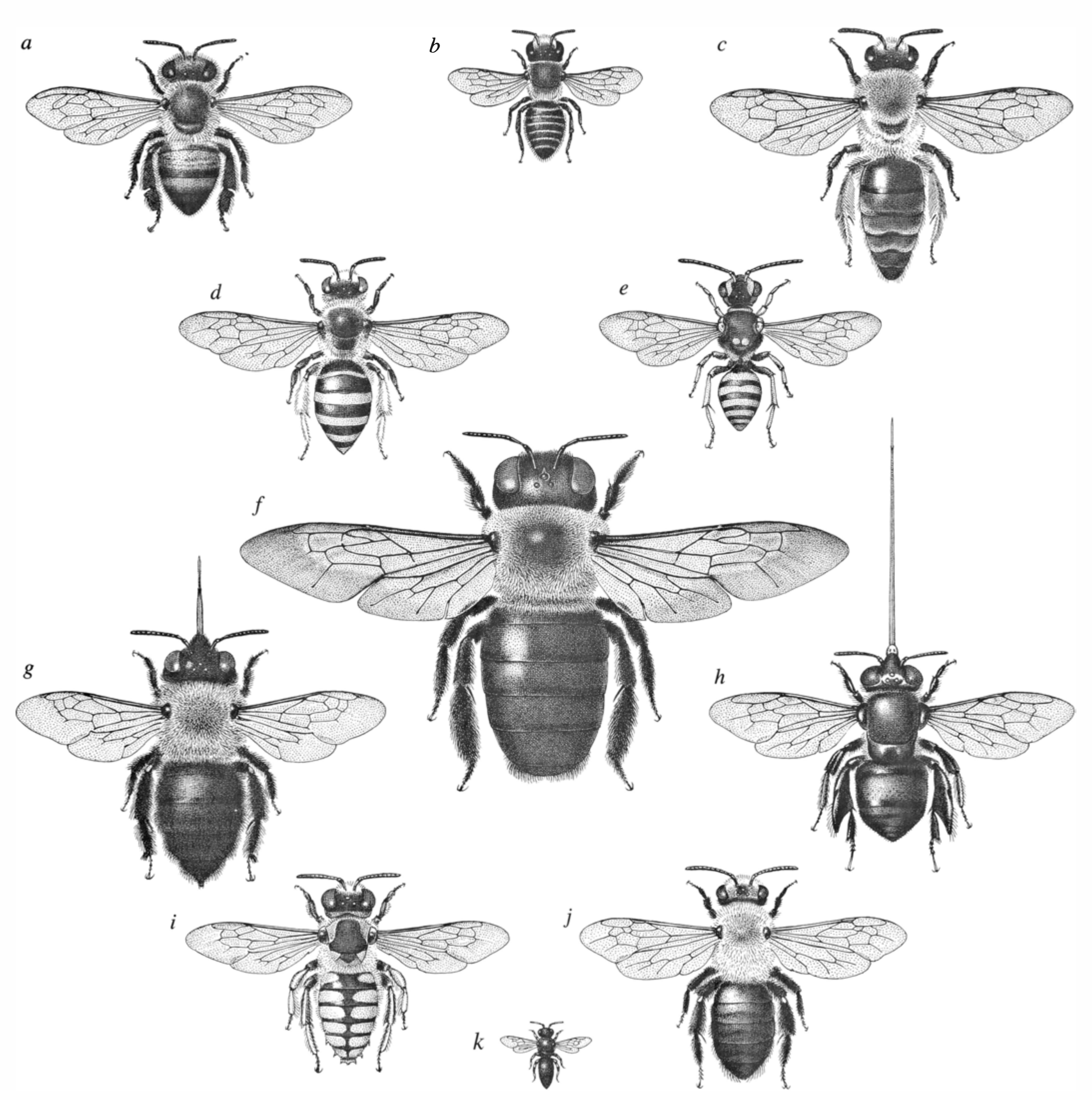
Las agrupaciones de nidos pueden persistir largo tiempo. En este sentido, una especie de abeja minera ha ocupado más de 40 años una pared de adobe cercana a Baltimore. Probablemente se mantengan esas congregaciones porque las jóvenes hembras memorizan en su primer vuelo los hitos visuales de la zona, del mismo modo que las nuevas obreras de abeja melífera retienen la situación de su colmena. También pueden ejercer un efecto de atracción las feromonas (señales químicas) u olores liberados por otras hembras de la congregación. Después de aparearse, una joven abeja retorna para construir su propio nido entre los otros, en un ambiente que ha demostrado su idoneidad por la supervivencia de sus antepasados.

Las abejas que anidan en el suelo suelen disponer de mucho espacio para instalar sus habitáculos. Sin embargo, se enfrentan al problema de proteger durante casi un año la provisión de miel y polen que han acumulado para la nutrición de su prole (y a las propias crías, de aspecto agusanado, delicadas y desvalidas) de la humedad del suelo y de una amplia variedad de organismos edáficos: bacterias, levaduras, hongos, nematodos y ácaros. La gran mayoría de abejas que viven en el suelo tapizan sus celdillas subterráneas de incubación con secreciones impermeables especiales antes de aprovisionarlas. Estas abejas poseen una glándula abdominal (la glándula de Dufour) que se abre cerca del aguijón. En algunas especies ocupa la mitad de la cavidad abdomi-

nal. La glándula contiene un líquido aceitoso de un fragante olor a almizcle. (Unas pocas especies recolectan resina de plantas o recortan fragmentos de hoja para tapizar sus celdillas de incubación. Los Fidelíidos y otras abejas que viven únicamente en desiertos no tapizan sus cámaras.)

Pude observar el comportamiento subterráneo de construcción del nido induciéndoles a anidar en cámaras estrechas de paredes de cristal rellenas de tierra. Después de que la abeja excave una cámara destinada a celdilla, y a menudo la pula hasta dejarla lisa y brillante con la placa pigidial situada en el extremo del abdomen, el animal deposita en ella la secreción de la glándula de Dufour, que esparce meticulosamente en derredor mediante rítmicas pasadas de la lengua, con las almohadillas aterciopeladas de su abdomen o con los cepillos de pelos de sus patas. La mayoría de abejas solitarias vuelan durante el día, recolectando provisiones, depositan un huevo por la tarde, sellan la celdilla, empiezan a excavar una nueva cámara al atardecer y aplican la secreción de la glándula de Dufour por la noche; la nueva celdilla está seca y lista para recibir las provisiones a la mañana siguiente. Trabajan día y noche prácticamente sin pausa.

Henry M. Fales y Abraham Hefetz, del Instituto Nacional del Corazón, Pulmón y Sangre de los Estados Unidos, y la autora analizaron las secreciones de las abejas de membrana *Colletes*. Encontramos que la glándula de



1. ABEJAS SOLITARIAS, comparadas con la abeja melífera, *Apis mellifera* (*a*), en dibujos realizados a una escala común. Las abejas solitarias son la cortadora de hojas de alfalfa, *Megachile rotundata* (*b*); la abeja de membrana *Colletes thoracicus* (*c*); la abeja de álcali *Nomia melanderi* (*d*); una abeja cuco, *Nomada luteoloides* (*e*), así llamada porque deposita sus huevos en los nidos de otras abejas solitarias; la abeja carpintera *Xylocopa virginica* (*f*); la abeja minera *Anthophora abrupta* (*g*); la abeja de las orquídeas *Euglossa ignita* (*h*), que se ilustra con su lengua insólitamente larga extendida; una abeja albañil del género *Anthidium* (*i*); una abeja minadora, *Andrena carlini* (*j*), y una abeja de membrana que fabrica seda, del género *Hylaeus* (*k*). A tamaño natural, *Hylaeus* mide cuatro milímetros. Estas abejas representan sólo unas cuantas de la multitud de especies de abejas solitarias, de las que existen unas 17.000.

Dufour contenía compuestos aromáticos, de olor a almizcle (lactonas macrocíclicas), que al depositarlos en la celdilla de incubación polimerizaban, formando una membrana flexible, transparente e impermeable al agua, compuesta de un poliéster natural (principalmente ácido 18-hidroxioctadecanoico y ácido 20-hidroxieicosanoico). La membrana constituía en cada celdilla una minúscula bolsa de plástico dotada de cierre y todo: una halda que la abeja hembra levantaba y sellaba después de poner un huevo. La membrana dura bastante, y permanece intacta en el suelo a lo largo de un año o más.

Por comparación analizamos también la secreción de la glándula de Dufour y el tapizado de la celdilla de incubación de *Anthophora abrupta*, una abeja minera. La gran glándula de Dufour de esta abeja contiene una mezcla de triglicéridos oleicos transparentes y ligeramente aromáticos. Tras su secreción en la celdilla de incubación se convierten, probablemente con ayuda de enzimas salivales, en diglicéridos blancos y céreos de olor rancio. Esta secreción se añade asimismo a las provisiones para la larva. La larva en desarrollo se la come, e incluso raspa y consume el revestimiento de la celdilla. Hasta que se descubrieron los hábitos alimentarios de las larvas de esta abeja minera la abeja colmenera era la única de la que se sabía que alimentaba a sus larvas con una secreción (jalea real, secretada por vía oral y compuesta principalmente por proteínas).

Las abejas que no viven bajo tierra no precisan proteger tan cuidadosamente a sus crías del exceso de humedad, y probablemente por ello presenten glándulas de Dufour relativamente pequeñas. La mayoría de los megaquílidos utilizan agujeros o nidos ya existentes, situados por encima del suelo, y construyen celdillas de incubación con fango, resina y fibras vegetales o mediante netas capas de óvalos y círculos de hojas y pétalos cortados con precisión. Las abejas cortadoras de hojas pueden dañar a las plantas. En un ejemplo extremo, la cosecha de dos hectáreas de soja se redujo en un 30 por ciento debido a la extracción de tejido foliar por abejas que anidaban en las cercanías. Algunas abejas albañil construyen agrupaciones de celdillas de incubación de fango o resina sobre ramas o muros. Una especie común de abeja solitaria es famosa porque desfigura los monumentos egipcios y griegos con sus numerosos nidos, grandes y formados por fango seco apelmazado.

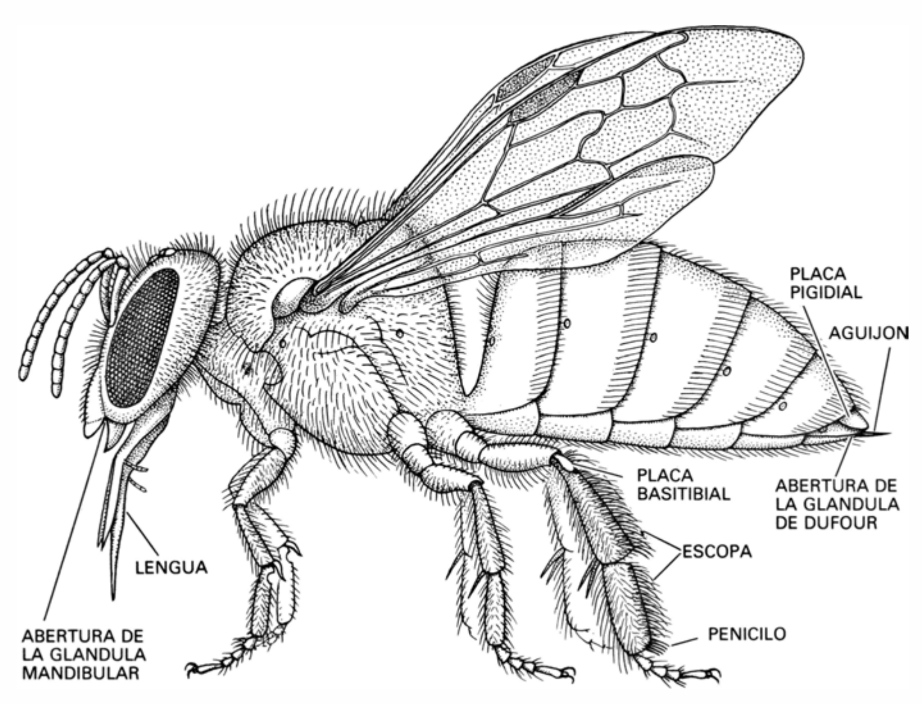
Con sus poderosas mandíbulas, las abejas carpinteras perforan agujeros netamente redondos en madera, bambú o tallos medulares. En sus galerías construyen series de celdillas de incubación separadas por tabiques de serrín aglutinado. A veces causan importantes daños en las estructuras de vigas y aleros de las casas.

Las abejas de membrana del género *Hylaeus* tienen aspecto vespiforme y transportan las provisiones internamente, al igual que las avispas, en lugar de hacerlo en pelos especiales, a la manera de otras abejas. Sólo las abejas *Hylaeus* construyen celdillas de incubación de auténtica seda, en el interior de agujeros ya existentes. La seda, segregada por la boca, la aplican las abejas hembra valiéndose de su ancha lengua. Unas pequeñas avispas depredadoras, de la subfamilia Penfredoninos, construyen también celdillas a partir de seda, lo que constituye un caso único entre las avispas. Es posible que las abejas hayan evolucionado, a través de formas primitivas como *Hylaeus*, a partir de ese grupo de avispas. La secreción de seda por insectos adultos es muy rara.

La mayor parte de hembras de abejas solitarias, al igual que las melíferas y los abejorros, pueden defenderse por sí mismas picando con el aguijón, pero su veneno suele ser suave. Los nidos de las abejas solitarias, a menos que se hallen densamente agregados, raramente atraen a depredadores vertebrados a sus escasas provisiones y nidada. Por ello, las abejas no han desarrollado el agresivo contrataque de aguijoneo en masa que provoca la perturbación de los nidos de las abejas colmeneras o de los abejorros. Sin embargo, los nidos de las abejas solitarias son particularmente vulnerables al ataque por parte de otros invertebrados y de microorganismos; a su vez, las abejas han desarrollado distintos métodos para repelerlos.

Los hongos son los enemigos principales de las abejas solitarias que anidan bajo tierra. La abeja tiene que trabajar con diligencia para concluir la preparación de las provisiones y depositar un huevo de modo que la larva llegue a consumir el alimento antes de que se estropee. El revestimiento de la celdilla de incubación aísla su contenido del agua libre del suelo. Sin embargo, el vapor de agua penetra en muchas celdillas acompañando a los gases que se precisan para la respiración de las larvas.

Las provisiones de la mayoría de abejas suelen ser una mezcla de miel y polen. Los azúcares de la miel son higroscópicos (atraen la humedad del aire), de modo que pueden irse diluyendo gradualmente. Se explicaría así la paradoja de que las larvas de abeja pesan a veces más de lo que origi-

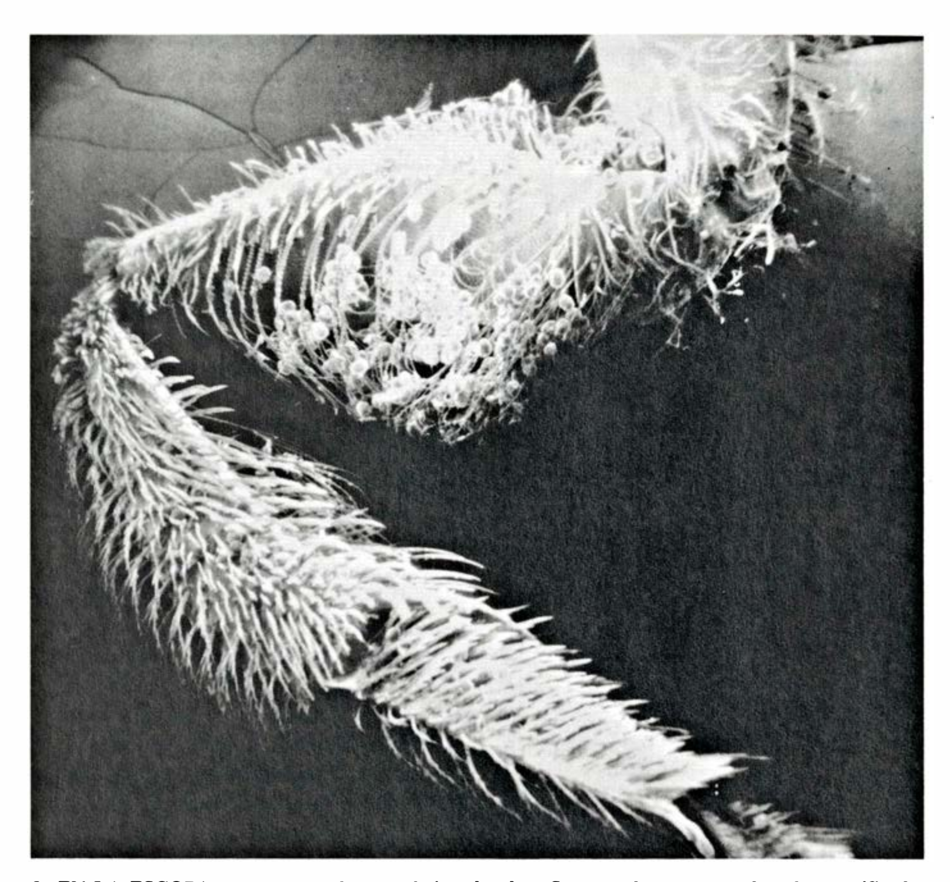


2. CARACTERISTICAS ANATOMICAS de las abejas solitarias típicas. Destacan la placa pigidial, que la hembra utiliza para alisar el interior del nido excavado en el suelo, y la glándula de Dufour (en el interior del abdomen), con la que aplica una secreción que impermeabiliza el interior del nido. Las secreciones de la glándula mandibular se emplean en la comunización y la autodefensa. La escopa, que en algunas especies se halla en el abdomen, en un dispositivo de pelos destinado al transporte del polen. Cuando excava o lleva provisiones al nido, la abeja anda arrodillada (sobre las placas basitibiales).

nalmente pesaban sus provisiones. El sistema funciona bien a menos que se produzca una proliferación de levaduras y bacterias en las provisiones. Estos microorganismos, por lo general presentes en el néctar de las flores, suelen depositarse con las mismas provisiones. Sin embargo, la elevada concentración de azúcar impide su crecimiento; en las abejas solitarias, como ocurre con las melíferas, el exceso de agua de la miel se evapora al tiempo que el néctar de las flores va convirtiéndose en miel a través de reacciones enzimáticas. Si las levaduras crecen sin freno, la larva sufre indigestión y se debilita o muere. La provisión fermentada sufre luego la invasión de hongos filamentosos.

Trabajando en la Universidad estatal de Utah con dos de mis colegas del Departamento de Agricultura (George E. Bohart, entomólogo, y mi marido Lekh R. Batra, micólogo), descubrí que los adultos y las puestas de abejas sufrían el acoso de no menos de 124 especies de hongos. La abeja de álcali, otra especie solitaria, ha desarrollado un interesante método para proteger a su puesta de las aproximadamente 49 especies de hongos que la atacan. Como hacen la mayoría de las demás abejas solitarias, la de álcali sella cada celdilla después de aprovisionarla y poner un huevo en ella. Durante mucho tiempo se supuso que estas abejas que "aprovisionaban en masa" no establecían contactos ulteriores con su cría. Sin embargo, cuando el contenido de una celdilla es infestado por un hongo, la abeja madre abre la celdilla y amontona tierra en ella. Este procedimiento reduce la cantidad de aire disponible para el crecimiento del hongo y evita así su extensión a las celdillas vecinas. Aunque algunas abejas que viven en el suelo pueden perder anualmente hasta la mitad de su descendencia por infecciones fúngicas, las especies que anidan en sitios más secos, como madera sana, troncos y paredes de adobe, resultan, por lo general, mucho menos afectadas.

Unas abejas solitarias especializadas, llamadas cuco o inquilinas, son parásitos comunes de otras abejas solitarias. Al igual que el ave que lleva su nombre, la abeja cuco no construye su nido, sino que deposita sus huevos en los de otras abejas. Alrededor del 15 por ciento de todas las especies de abejas son cuco. Estos parásitos pueden mostrar gran especificidad de hospedador, o patrón; las hay que explotan a un solo patrón, mientras que otras eligen un grupo de especies patrón emparentadas. La mayoría de familias de abejas comprenden algunas especies inquilinas, que pueden aprovecharse de patrones pertenecientes a su propia familia o a otras. Las jóvenes larvas de muchas abejas cuco tienen largas mandíbulas que emplean para aplastar a la larva de la abeja hospedadora; las larvas de más edad de las cuco, que se alimentan cuando el patrón ya ha sido eliminado, presentan mandíbulas normales, pequeñas. Por lo general, las abejas cuco que más fácilmente se observan son las especies de *Nomada* (Antofóridos), delgadas, vespiformes, de color rojizo o amarillo y negro, que revolotean a principios de primavera cerca del suelo, entre las flores del bosque, en busca de nidos temporalmente desocupados de su hospedador, *Andrena*.



3. EN LA ESCOPA transportan algunas abejas el polen. Se trata de un grupo de pelos ramificados situado cerca de la parte superior de esta micrografía de la pata posterior de una abeja del sudor del género *Lasioglossum*. En la escopa se ven varios granos de polen. El aumento es de unos 62 diámetros.

Una abeja solitaria debe pasar varias horas diarias alejada de su nido, recolectando néctar y polen. Durante ese tiempo la indefensa prole resulta particularmente vulnerable. Las celdillas de incubación de algunas especies se hallan herméticamente selladas con una gruesa tapa de resina, secreción o arcilla, pero las celdillas de muchas abejas solitarias tienen un cierre permeable de tierra ligeramente apelmazada, hojas o serrín de madera, que los parásitos y depredadores de insectos atraviesan con facilidad. La abeja madre puede proteger el nido en su ausencia situándolo de modo que la entrada quede oculta, llenando temporalmente la galería de tierra, amontonándola en un pequeño túmulo sobre la entrada o bien construyendo una torrecilla compacta de tierra que desanime a los insectos que se acercan andando. No obstante, las puestas de las abejas solitarias sufren pérdidas frente a gran variedad de animales depredadores y parásitos: avispas, hormigas, varios tipos de moscas y escarabajos, estrepsípteros, ácaros y nemátodos. Algunos parásitos depositan sus huevos o larvas sobre flores, de donde los recoge accidentalmente la abeja al recolectar alimento, los acarrea hasta el nido y los agrega a la provisión de la celdilla de incubación; se encuentran así listos para atacar a la larva de la abeja.

Las flores coloreadas, simétricas y fragantes de las plantas superiores evolucionaron para atraer a los animales dispersadores de polen. Las abejas son sus polinizadores más eficaces, por varias razones, entre las cuales se cuentan su gran abundancia, su vuelo rápido, su tendencia a visitar, una tras otra, varias

flores de la misma especie, su necesidad de grandes cantidades de néctar y polen y sus pelos especializados, que atrapan y sostienen hasta 15.000 granos de polen por abeja.

Estos insectos presentan varios tipos de pelos, que se agrupan en el cuerpo y las patas según su función. Los densos pelos de las patas posteriores de la mayoría de abejas solitarias forman un cepillo, donde retienen el polen, denominado escopa. (En los Megaquílidos la escopa se halla bajo el abdomen.) Las abejas melíferas y sus parientes presentan manchas brillantes y desnudas en sus patas posteriores, conocidas por corbículas o cestillos de polen, que transportan agregados de polen humedecidos por néctar, o bien material para el nido. Los pelos de las abejas se hallan modificados según el tipo de polen que recolecta cada especie. Para sostener granos de polen fino y seco, lo mejor es un acúmulo de pelos ramificados y plumosos, parecidos al vello. Los granos de polen grandes o pegajosos requieren pelos más tiesos. Suelen presentar éstos ramas más cortas o crestas espirales parecidas a sacacorchos. Los hay con las puntas espatuladas o ganchudas.

Los peines de los pelos cerdosos implantados en las patas y las piezas bucales de la abeja sirven para el aseo y la transferencia de polen a la escopa. La secreción de la glándula de Dufour se aplica con pelos rectos especiales, dispuestos en penachos, a modo de pinceles. Para recolectar perfumes florales o aceites vegetales algunas abejas solitarias han desarrollado unos pelos aterciopelados que forman esponjas y pelos aplanados dispuestos en peines.

El valor de las abejas en la polinización de las plantas silvestres y cultivadas es incalculable. Es imposible evaluar los beneficios de esta acción polinizadora sobre las plantas silvestres, que polinizan sobre todo las abejas solitarias. Se ha estimado que, en los Estados Unidos, el valor de unos 90 cultivos distintos que dependen de la polinización de los insectos para alcanzar una cosecha máxima es de 17.000 millones de dólares anuales. Si se incluyen en el cálculo las semillas de las plantas forrajeras para el ganado que polinizan los insectos, resulta que un tercio, aproximadamente, de los recursos alimentarios de la nación depende, directa o indirectamente, de la polinización por insectos, principalmente abejas. Es razonable suponer que a las abejas solitarias corresponde al menos la mitad de esa actividad polinizadora



4. SUPERFICIE INTERNA de la pata posterior de la misma abeja solitaria del género *Lasioglossum*. Se advierten (*a la izquierda*) los pelos acanalados en espiral que sirven para manipular el polen y (*a la derecha, abajo*) el penicilo, estructura parecida a un pincel y destinada a extender una secreción impermeable en el nido para proteger a la prole de las micosis. El aumento de la foto es de 300 diámetros.

de los cultivos norteamericanos, proporción que seguramente sea superior en aquellas zonas donde la apicultura se halla menos extendida.

Por desgracia, los cambios introducidos por la moderna agricultura a gran escala y por la urbanización están diezmando las poblaciones de abejas solitarias. Cuando se siembran grandes campos con una única especie de planta cultivada, es decir, como monocultivos, en los que todas las plantas florecen simultáneamente en un breve período de tiempo, las poblaciones de abejas solitarias son incapaces de culminar toda la polinización; cuando se marchitan las flores, las abejas pierden su fuente de alimento. El cultivo y la construcción eliminan hospedadores florales suplementarios y zonas de anidamiento. La irrigación destruye los nidos. También aumenta el daño que infligen los hongos a las puestas. La aplicación negligente de plaguicidas mata muchas abejas. El dióxido de azufre del aire contaminado obliga a los insectos a reducir su tiempo de vuelo.

Se aprecian estos efectos al comparar, por ejemplo, las poblaciones de abejas de manzanos en flor de un huerto comercial grande y bien fumigado con las poblaciones de abejas de árboles en flor de huertos abandonados o en la linde de un bosque. Para conseguir la polinización adecuada de sus cultivos en ausencia de suficientes abejas nativas, los agricultores suelen alquilar colmenas de abejas melíferas a los apicultores, a un coste de unos 20 dólares por colmena. A veces se precisan cientos o incluso miles de colmenas. El valor de los servicios de polinización excede con mucho el valor de la miel y de la cera que se obtiene de las abejas colmeneras.

Las abejas melíferas polinizan muchos tipos de plantas, pero en algunas su actuación es ineficaz. Por ejemplo, la flor de la alfalfa tiene un pequeño resorte que se dispara cuando una abeja introduce su cabeza en la flor. Los estambres se proyectan hacia arriba y tocan a la abeja en la cabeza, empolvándola de polen. Parece que a las abejas melíferas no les agrada ese golpe en la cabeza y, puesto que son insectos relativamente inteligentes, aprenden a introducir su larga lengua en la parte lateral de la flor, evitando el resorte. De este modo toman el néctar pero no realizan la polinización. Al ser la alfalfa una de las principales leguminosas forrajeras, la obtención de semillas (una industria que mueve 100 millones de dólares anuales en los Estados Unidos) reviste el máximo interés.

En el noroeste de los Estados Unidos y en Canadá se emplean abundantemente dos especies de abejas solitarias (la abeja cortadora de hojas de alfalfa y la abeja de álcali) para la polinización de la alfalfa. A esos insectos perseverantes no parece importarles el golpe de la flor; recolectan el polen para aprovisionar sus nidos cuando éste se derrama sobre ellos. La abeja cortadora de hojas de alfalfa, originaria de Europa, visita sucesivamente muchas flores, y es una eficaz polinizadora. Anida en grupos. Los agricultores construyen agujeros adecuados en "bandejas para abejas" que disponen en refugios parecidos a cobertizos en los campos de alfalfa. Las celdillas de incubación de esta abeja están hechas de fragmentos de hojas de alfalfa.

La abeja de álcali es una especie de halíctido nativa de los Estados Unidos. Le gusta anidar en planicies alcalinas, donde el subsuelo se mantiene bastante húmedo. Los agricultores que se valen de esta abeja construyen "camas de abeja", surcos tapizados de plástico que instalan en los campos de alfalfa. Los surcos se rellenan de un manto especialmente preparado que se mantiene en la humedad exacta para que atraiga y albergue densas congregaciones de abejas de álcali. Puede haber hasta 2100 nidos por metro cuadrado.

Otra solitaria utilizada comercialmente es una abeja albañil, la cornuda japonesa. Las flores del manzano quedan a menudo mal polinizadas por las abejas melíferas, proclives a trabajar lentamente, a evitar tocar los estambres y a marcharse volando para recolectar en los dientes de león y otras malas hierbas. Hace unos 40 años, los agricultores japoneses advirtieron que las pequeñas abejas cornudas que anidaban en sus techos de bálago eran buenas polinizadoras de los manzanos. Con los años se ha perfeccionado la explotación de esta abeja, y en la actualidad, en todos los distritos del Japón donde se cultivan manzanos, pueden verse refugios con cañas vacías para que aniden ellas. Recientemente, en colaboración con Yasuo Maeta, de la Universidad de Shimane, y otros investigadores japoneses, he establecido con éxito poblaciones de este polinizador asiático en los Estados Unidos orientales, donde se está estudiando su adaptabilidad al clima y su aceptación del material de anidamiento disponible.

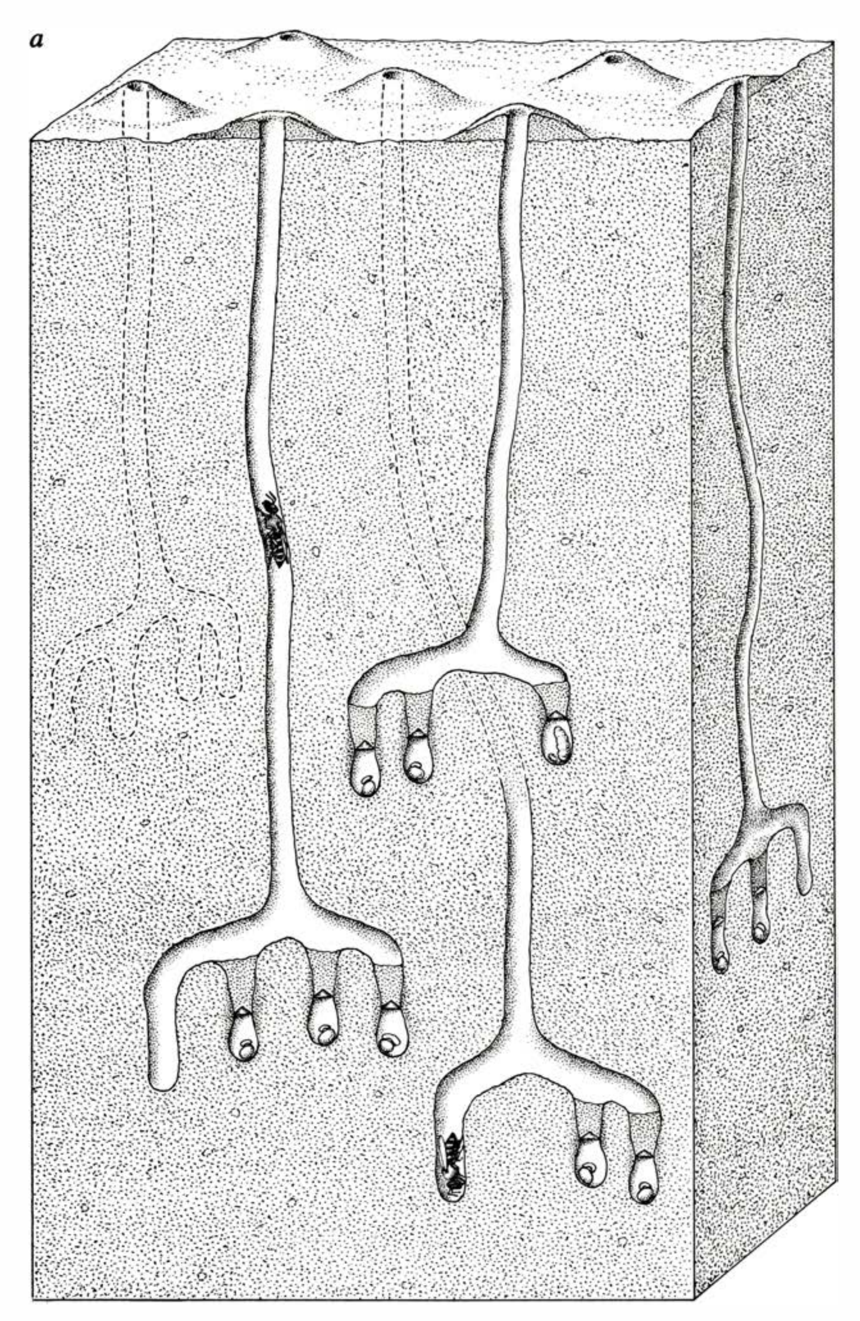
Muchas especies de abejas presentan ciclos biológicos y costumbres que dependen de la disponibilidad de determinadas plantas hospedadoras. Las abejas que recolectan polen de una es-

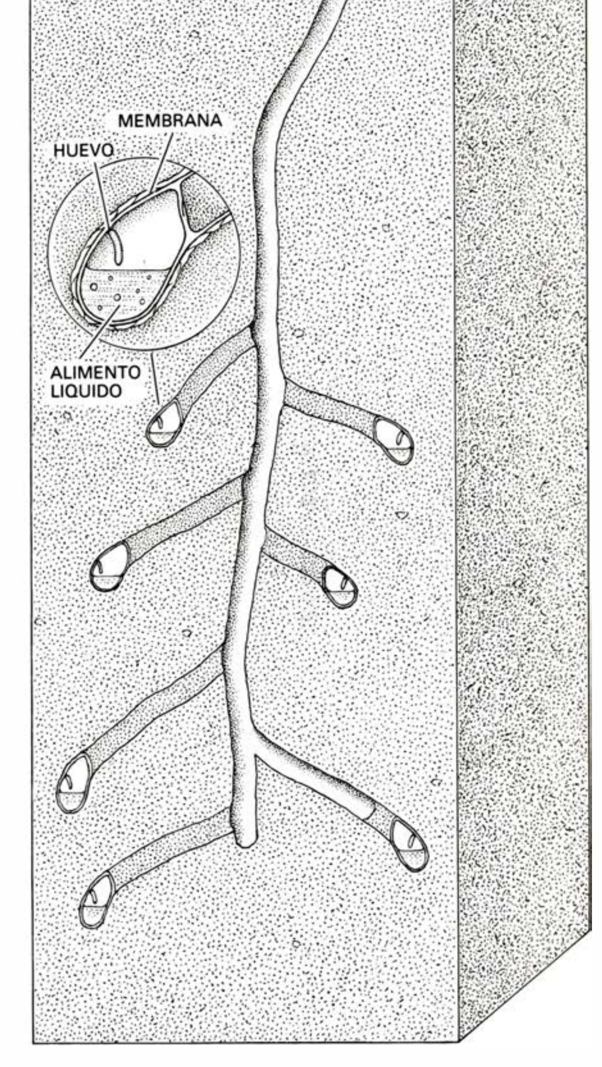
pecie o de unas pocas plantas emparentadas se denominan oligolécticas. Las abejas que, como la colmenera, pueden recolectar polen de una extensa gama de especies, gracias al largo período recolector de actividad de los adultos, se denominan polilécticas.

Las plantas con flores y las abejas oligolécticas han desarrollado algunas relaciones mutualistas notables. Por ejemplo, las calabazas nativas americanas son polinizadas con la máxima eficacia por las abejas calabaceras, que son varias especies nativas de abejas mineras. Algunas especies de halíctidos polinizan primaveras nocturas y vuelan de noche, algo insólito entre las abejas; esta actividad se ve facilitada por sus ojos, que los poseen muy grandes para una mejor captación de luz. Otras abejas mineras especializadas polinizan a glorias matutinas (*Ipomoea*) silvestres. Quizá las abejas solitarias más altamente especializadas sean las que visitan flores que producen aceites, que recolectan en lugar del néctar (para mezclarlos con polen en la provisión para la cría); las abejas cobran el aceite por medio de pelos dispuestos en estructuras parecidas a peines.

Las orquídeas se cuentan entre las flores más especializadas. Algunas han desarrollado métodos únicos de explotar las pautas de comportamiento de las abejas solitarias. Ciertas orquídeas poseen falsos nectarios: manchas coloreadas que no producen néctar. Cuando una abeja hurga en un falso nectario en busca de néctar, un polinio (paquete de polen) se fija al insecto, que lo transporta para polinizar a la siguiente orquídea. Este engaño funciona hasta que las abejas aprenden que los nectarios no producen nada.

Otras orquídeas tienen modelos de color y olores afrodisíacos que recuerdan el aspecto o el olor de abejas o avispas hembras, lo que atrae a los machos. Cuando éstos pretenden copular con la flor se les prende un polinio, que depositarán en la siguiente orquídea



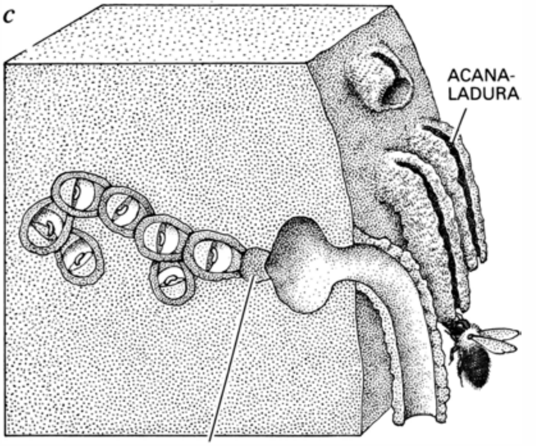


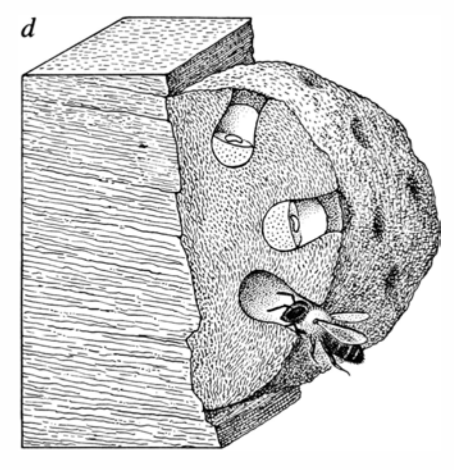
5. DISPOSICION DE LOS NIDOS de seis especies de abejas solitarias. Cada nido tiene varias celdillas individuales, a cada una de las cuales la hembra suministra provisiones para la larva antes de poner el huevo. Las celdillas suelen construirse al ritmo de una por día (con buen tiempo) en el período de varias semanas durante el que la hembra adulta es activa. El nido de la abeja de álcali, *Nomia melanderi* (*a*), se halla en suelo húmedo. La abeja de membrana *Colletes thoracicus* (*b*), que también anida en el suelo, recibe ese nombre vulgar porque tapiza el interior de cada celdilla con una membrana de

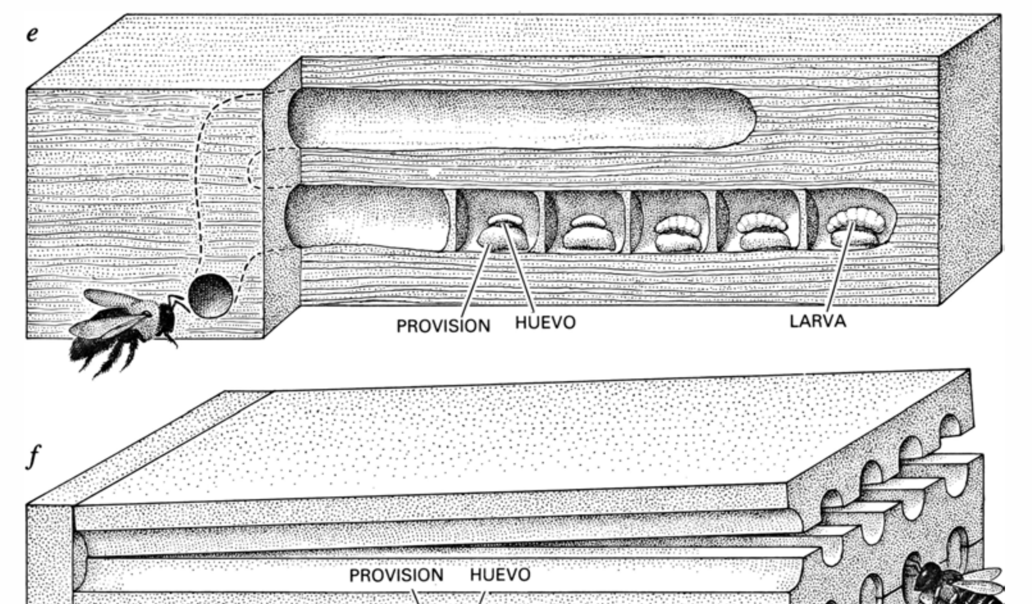
que los atraiga. Otras orquídeas imitan a ciertos machos de abejas mineras. Cuando una abeja macho, agresivamente territorial, ve la flor de la orquídea agitándose en el viento, carga contra ella en su esfuerzo por ahuyentar al "rival", y se lleva un polinio adherido a la cabeza.

La relación más compleja se da entre ciertas orquídeas sudamericanas que no producen néctar ni polen y varias especies de abejas de las orquídeas. Las abejas macho tienen las patas posteriores engrosadas, con hendiduras tapizadas de pelos que conducen a bolsas internas, y almohadillas aterciopeladas en sus pies delanteros. Los machos forman *leks*, enjambres compuestos únicamente por machos, que atraen a las hembras para aparearse. Algunos machos son más atractivos que otros porque han recolectado mezclas de fragancias de las orquídeas. Para ello cepillan las glándulas odoríferas de la flor con sus pies delanteros y llenan las hendiduras de sus patas posteriores con partículas olorosas. Mientras la abeja realiza esta operación colecta un polinio de la orquídea. Puesto que estas abejas pueden volar hasta 23 kilómetros en un solo día, resultan polinizadores de plantas de distribución dispersa, como algunas de esas orquídeas.

Aparentemente, las abejas de las orquídeas responden a otros olores. Los machos de cierta especie se han convertido en una verdadera molestia porque les atraen las casas que se han espolvoreado con DDT para el control de los mosquitos. Recolectan el polvo y lo acumulan en las hendiduras de las patas. El compuesto no parece dañar a las abejas macho, pero se desconoce si tiene o no el pretendido efecto afrodisíaco sobre las hembras.







poliéster que ella misma fabrica. La abeja minera *Anthophora abrupta* (*c*) emplea una técnica distinta en suelo seco. La abeja albañil *Chalicodoma* (*d*) construye su nido sobre la superficie de madera o roca; la carpintera *Xylocopa virginica* (*e*) perfora la madera. Algunos agricultores disponen "bandejas de abejas" (*f*) para que aniden abejas cortadoras de hojas de alfalfa, que ayudan a la polinización de esta planta.

Los machos de las abejas solitarias suelen emerger de la pupa días antes que las hembras de su especie. Comen néctar floral y polen y buscan hembras vírgenes acabadas de salir del huevo. En algunas especies los machos forman grupos laxos que patrullan conjuntamente el lugar de anidamiento, hitos cercanos o flores que las hembras visiten regularmente. Cuando los machos ven una abeja hembra o un objeto de forma similar, saltan sobre ella, pero a menos que haya una feromona sexual presente la dejan ir de inmediato. Si aparece una hembra virgen, rápidamente puede agruparse sobre ella un tropel de machos que se retuercen, intentando todos ellos copular. Por lo general el primer macho que sujeta a la hembra se agarra a ella firmemente y consigue aparearse. Los machos de la mayoría de especies se limitan a competir entre sí para alcanzar primero a la hembra, pero no son especialmente agresivos. En algunas especies de abejas carpinteras y de abejas albañil los machos son agresivos y luchan para excluir a otras abejas macho de su pequeño territorio.

En la antigua India las batallas territoriales de las abejas carpinteras se denominaban "juegos de abejas". Se dice que el retorno al hogar de estas abejas se aprovechaba para el transporte de minúsculos mensajes. Buena parte de la actividad de las abejas carpinteras que en la actualidad pueden contemplar los propietarios de un nido consiste en la persecución de los machos, que a veces se dirigen en la dirección de aves o aviones que sobrevuelen el lugar. Los machos territoriales ejecutan luchas simuladas, vuelan en zigzag dándose la cara hasta que uno de ellos se rinde y abandona.

Algunas abejas albañil del género *Anthidium* constituyen un caso insólito entre los insectos: los machos son mayores que las hembras. La razón probablemente reside en que aquéllos se embisten y agarran unos a otros en sus batallas aéreas; la fuerza física y el peso harían más fácil la conservación de un territorio visitado por hembras.

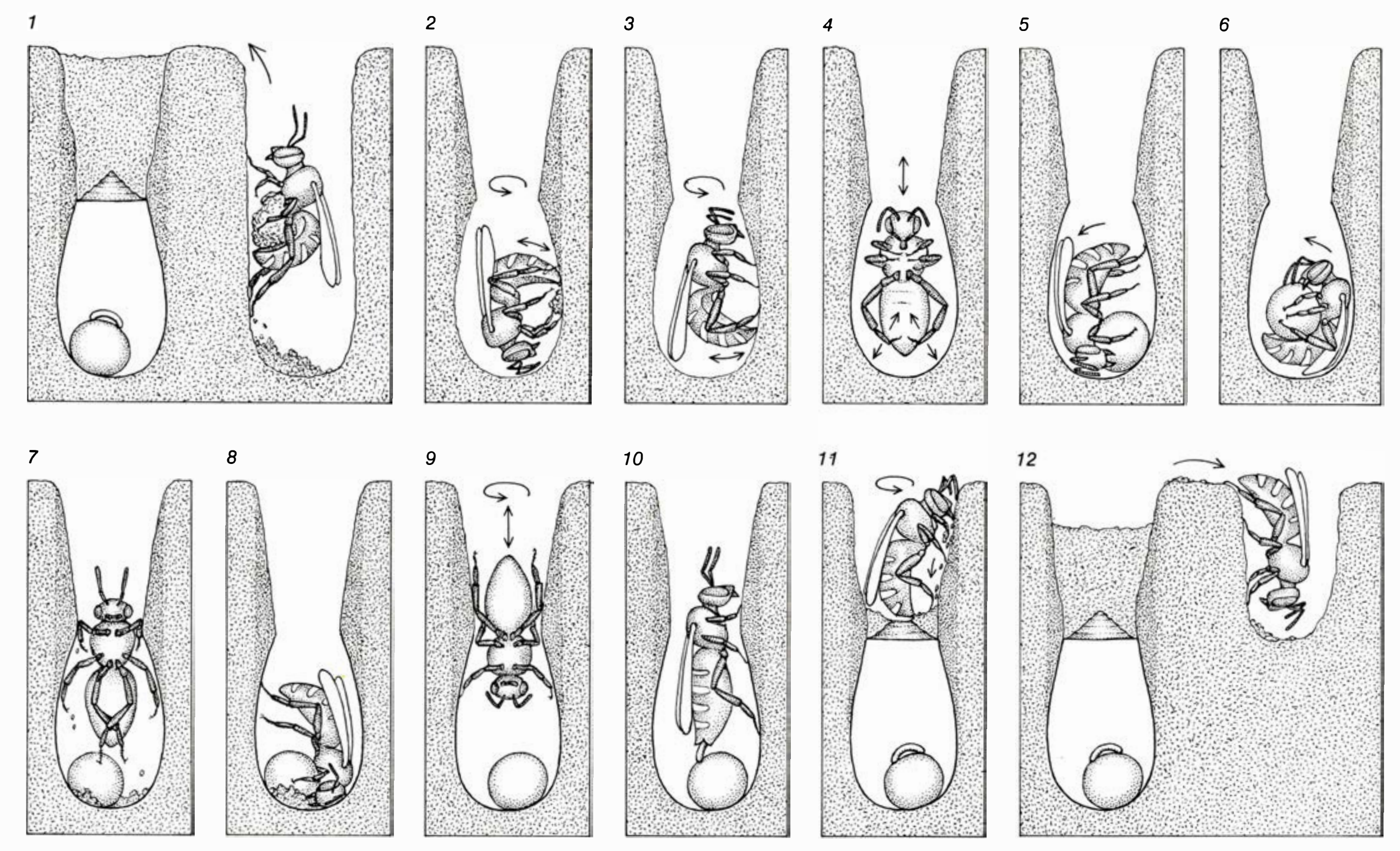
Estos machos atacan cuantos insectos se introduzcan en su territorio. Con sus fuertes mandíbulas pueden romper las alas del intruso y perforar su cuerpo con sus recias espinas abdominales. Curiosamente, muchas abejas macho que durante el día luchan por el territorio se amontonan pacíficamente durante la noche para dormir.

En 1802, el naturalista William Kirby escribió: "Con frecuencia he pensado que si los caballeros que se divierten con experimentos químicos dirigieran su atención a los insectos quizá llegaran a descubrir poderosos medicamentos. La variedad de fuertes olores que estas pequeñas criaturas emiten es maravillosa... Muchas melitas despiden un fuerte olor, que en algunas se acerca al del ajo o la cebolla". Un pasatiempo interesante, aunque arriesgado, es oler cuidadosamente a abejas y avispas vivas cautivas, que, efectivamente, despiden una rica gama de olores, que sin duda debe servirles en la comunicación y la defensa. Pequeñas glándulas ubicadas en la base de las mandíbulas liberan al abrirse varias combinaciones de terpenos, aldehídos, cetonas, ésteres, piracinas y otros compuestos acres o aromáticos.

Algunas abejas macho aplican tales secreciones a la vegetación para delimitar su territorio. En otras especies las secreciones sirven para atraer a uno o ambos sexos. Por ejemplo, si capturamos con un cazamariposas un buen número de individuos de los géneros *Colletes, Nomia* o *Anthophora*, en una congregación de nidos, los insectos muerden la red en su afán por escapar; y al hacerlo liberan secreciones de las glándulas mandibulares. Otras abejas, situadas contra el viento, son atraídas hacia la redada de abejas cautivas. Que son las secreciones de las glándulas mandibulares y no otra cosa lo que atrae a las demás abejas lo demuestra el hecho de que a las abejas también les atraen las glándulas mandibulares extirpadas o compuestos sintéticos apropiados, mezclados en la proporción adecuada. Las pequeñas abejas carpinteras *Ceratina* y *Pithitis* producen secreciones acres de la glándula mandibular cuando se las molesta. Las embadurnan sobre su cuerpo y el del intruso. Esas secreciones repelen las hormigas que invaden el nido.

Cabe atribuir la adquisición de un comportamiento social por parte de las abejas a que la supervivencia de la prole aumenta si alguna abeja monta guardia mientras la que busca alimento está ausente. Otra ventaja es la posibilidad de compartir la construcción del nido y su aprovisionamiento.

Pudo adquirirse el comportamiento de dos maneras. La primera es la prolongación de la vida de la abeja madre, hasta el punto de poderse establecer una relación de ayuda mutua con sus hijas; se observa esta pauta en algunos halíctidos y antofóridos. La segunda manera es que las abejas de la misma generación compartan los nidos y cooperen en la construcción y el aprovisionamiento del refugio; esta pauta se observa en unas pocas especies de halíctidos, andrénidos, megaquílidos (abejas albañil) y ápidos (abejas de las orquídeas). El comportamiento social, que establece una división del trabajo en el que algunas abejas son reinas, que dominan a las otras y ponen huevos, y otras abejas son obreras no reproductoras, es relativamente raro en las abejas, y se conoce sólo en algunos halíctidos y en algunos pequeños antofóridos (abejas carpinteras), aparte, claro está, de las abejas sociales más conocidas: abejas inermes, abejorros y abejas colmeneras (ápidos).



6. CONSTRUCCION DEL NIDO por una abeja de álcali, *Nomia melanderi*, a lo largo de un período de 24 horas. En *1* la hembra ha terminado una celdilla y empieza a excavar la siguiente. Cuando alcanza la profundidad apropiada apisona tierra a lo largo de los bordes (*2*). Luego alisa el interior de la celdilla con su placa pigidial (*3*) y aplica un recubrimiento impermeable con una secreción de su glándula de Dufour (*4*). Ya puede depositar las provisiones (*5, 6*), compuestas por una mezcla de miel y polen, que alimentarán a la larva. Después de preparar la pelota de provisiones (*7*) y extraer los desperdicios de la celdilla (*8*), pule de nuevo las paredes de ésta (*9*) y pone un huevo (*10*). Cubre la celdilla (*11*) y añade un tapón de tierra que procede de los primeros estadios de la excavación de lo que será la tercera celdilla en el ciclo de construcción del habitáculo (*12*). (Las ilustraciones son de Tom Prentiss.)

La invención del globo aerostático y el nacimiento de la química

Los primeros vuelos tripulados en globo, que tuvieron lugar en Francia hace 200 años, se inspiraron en la investigación básica sobre la naturaleza de los gases realizada por algunos de los principales químicos de la época

Arthur F. Scott

El primer vuelo libre realizado por un ser humano fue la ascensión en globo desde los jardines del Castillo de la Muette, situado en la zona occidental de París, el 21 de noviembre de 1783. Los pasajeros fueron Pilatre de Rozier, joven director de un museo de la ciencia de París, y el Marqués d'Arlandes, un oficial del ejército muy relacionado con la corte de Luis XVI. En un globo hinchado con aire caliente diseñado por los hermanos Joseph-Michel y Jacques-Etienne Montgolfier, los dos pasajeros permanecieron en el aire unos veinticinco minutos, recorrieron unos ocho kilómetros y descendieron ilesos, a campo abierto, cerca del camino a Fontainebleau.

El vuelo no sólo fue notable por derecho propio, sino que también compendió uno de los grandes logros de la química: el ocaso de la teoría del flogisto sobre la composición química debido al impacto del descubrimiento de que los gases eran distinguibles entre sí por el peso. Los nombres de cuatro químicos preeminentes –Joseph Black, Henry Cavendish, Joseph Priestley y Antoine Lavoisier– figuran inscritos en los anales de los primeros vuelos en globo, tripulados o no. Sus trabajos abrieron el camino para la primera comprensión clara de la naturaleza química de la materia.

Los hermanos Montgolfier vivían en Annonay, un pueblo cercano a Lyon. Fascinados con la idea de volar, se les ocurrió que una bolsa de papel llenada con el humo de una hoguera podría ascender en el aire. Hacia fines de 1782, llevaron a cabo dos ensayos preliminares, que les convencieron de que una bolsa muy grande llenada con la suficiente cantidad de aire caliente (humo procedente de una hoguera) podría flotar en la atmósfera. La primera demostración pública de su idea la hicieron en Annonay, el 4 de junio de 1783. El globo fue un saco esférico hecho de lino y forrado de papel. Tenía unos 11 metros de diámetro y un peso aproximado de 226 kilogramos. El globo se situó, para ser hinchado, sobre un fuego alimentado con pequeños haces de paja. Cuando fue soltado, se elevó a una altura considerable, recorrió unos dos kilómetros y medio y descendió al cabo de diez minutos. El ensayo produjo un gran entusiasmo y su noticia se esparció rápidamente por Francia y el resto de Europa.

El siguiente vuelo de un globo tuvo lugar dos meses más tarde, en París, y fue llevado a cabo por personas distintas. El ensayo fue supervisado por un físico, Jacques Charles, quien, aprovechándose de sus conocimientos sobre los últimos logros conseguidos en el estudio de los gases, había decidido inflar el globo con hidrógeno. Como este gas podía fácilmente escapar a través del forro del papel, el globo se construyó con una tela fina de seda recubierta de goma. El hidrógeno se obtuvo por la acción del ácido sulfúrico sobre limaduras de hierro. Se necesitaron varios días para inflar el globo hasta alcanzar su diámetro máximo de cuatro metros, y se consumieron aproximadamente 226 kilogramos de ácido y otros 454 de hierro. Un inmenso gentío contempló la ascensión desde los Campos de Marte, el día 27 de agosto. El globo permaneció en el aire durante 45 minutos y aterrizó finalmente en una campiña próxima a Gonesse, distante unos 24 kilómetros, donde aterrorizó tanto a los lugareños que éstos lo hicieron trizas.

Alrededor de tres semanas más tarde, el ensayo de los Montgolfier fue repetido en Versalles, pero esta vez ante Luis XVI y su corte. Llenar el globo con aire caliente fue una tarea sencilla comparada con la misma operación con hidrógeno, y así, en diez minutos, el globo estuvo listo para volar. El globo fue equipado, para esta demostración, con un cestón que llevaba dentro a una oveja, un gallo y un pato. En esta oportunidad, el globo ya no fue el sencillo de la primera ascensión, sino que aparecía pintado al óleo con colores vistosos. El vuelo finalizó en un bosque situado a más de tres kilómetros de distancia. Los primeros viajeros aéreos resultaron indemnes.

Una vez establecida la viabilidad de los vuelos en globo, se probaron rápidamente sus posibilidades prácticas. En octubre, de Rozier se elevó a 24 metros en un globo de Montgolfier sujeto a tierra con una soga y permaneció en el aire durante más de cuatro minutos. Un mes más tarde, de Rozier y d'Arlandes realizaron su vuelo histórico cruzando París. Para no ser menos, Charles embarcó con un pasajero en París, el 1 de diciembre, en un globo de hidrógeno. El vuelo duró dos horas y les transportó hasta la aldea de Nesle, distante unos 45 kilómetros. Allí, el pasajero descendió y Charles continuó solo, ascendiendo hasta una altitud de cerca de los 3000 metros. En el intervalo de seis meses el hombre había conquistado el aire y aprendido cómo volar.

1. PRIMERA DEMOSTRACION PUBLICA del vuelo de un globo inflado con aire caliente, captada en esta estampa contemporánea un tanto fantasiosa. El ensayo fue realizado por los hermanos Joseph y Étienne Montgolfier cerca de su casa, en Annonay (Francia), el 4 de junio de 1783. El globo, un saco esférico hecho de lino y forrado de papel, medía unos 11 metros de diámetro y pesaba más de 225 kilogramos. Se infló poniéndolo sobre fuego alimentado con haces de paja. El vuelo duró 10 minutos.





2. PRIMER VUELO LIBRE tripulado de un globo inflado con aire caliente, que tuvo lugar sobre París, el 21 de noviembre de 1783. El globo tan primorosamente decorado, diseñado por los hermanos Montgolfier, medía 14 metros de diámetro y otros 21 de alto. Incluyendo a los dos pasajeros, Pilatre de Rozier y el Marqués d'Arlandes, el peso total fue de 726 kilogramos. (Panorámica tomada desde la terraza de la casa de Benjamín Franklin, en Passy.)

En los años siguientes a 1783 tuvieron lugar muchos vuelos en globo por toda Europa. Particularmente notoria fue la ascensión realizada por Joseph Montgolfier, el único de los dos hermanos que llegó a volar. Realizó su vuelo desde Lyon, el 10 de enero de 1784. El globo, bautizado con el nombre de *Flesselles*, fue el mayor de los construidos hasta la fecha: tenía 55 metros de alto y otros 30 de circunferencia. Se infló en 17 minutos con un fuego alimentado con paja y se elevó a una altura de más de 900 metros, llevando a bordo siete personas.

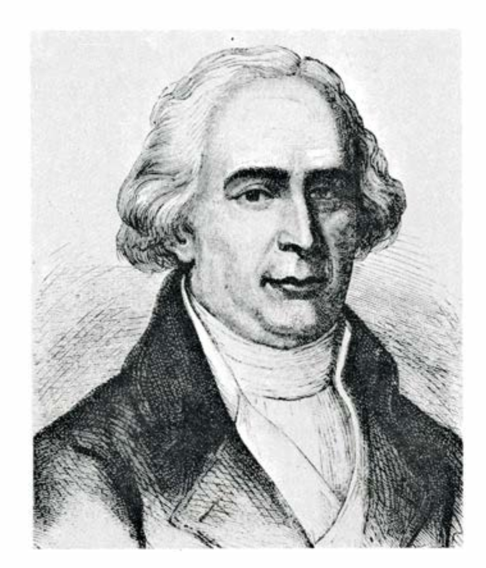
Los éxitos se sucedieron en los viajes en globo. En agosto de 1784, un químico francés, Guyton de Moreau, acompañado del abate Bertrand, realizó un vuelo a más de 3000 metros para recoger datos sobre la temperatura y presión de la atmósfera. En enero del año siguiente, Jean Pierre Blanchard, un aeronauta francés, y John Jeffries, un físico americano, lograron la primera travesía del Canal de la Mancha (de Dover a Calais).

Con motivo del primer vuelo realizado en Annonay, la Academia de Ciencias francesa, a instancias del gobierno, nombró una comisión para que informara del ensayo y planeara la realización de otros futuros. Lavoisier, el químico francés cuyos descubrimientos científicos figuraban entre aquellos en los que se basaron los primeros vuelos en globo, fue uno de los comisionados y quien desempeñó el principal papel en el trabajo de la comisión. Evidentemente, el gobierno francés consideró la invención del globo como un hecho muy significativo, puesto que cubrió los gastos de algunos de los vuelos posteriores realizados por la comisión.

La reacción de los científicos británicos ante la invención del globo fue menos entusiasta. En noviembre de 1783, el rey Jorge III y su corte, en Windsor, fueron invitados a una exhibición con un globo de hidrógeno. Impresionado, el rey escribió al presidente de la Royal Society de Londres, Sir Joseph Banks, ofreciéndose a sufragar los gastos de otros ensayos. La respuesta venía a decir que puesto "nada bueno" podría esperarse de tales ensayos, la Sociedad no tenía interés en ellos.

Con todo, el valor potencial del globo en la guerra fue reconocido rápidamente Un folleto sobre el tema se publicó el mismo mes de la demostración en Windsor. Benjamin Franklin expresó claramente la situación en una carta fechada poco después:

"Tal como usted señala, la invención del globo parece ser un descubrimiento de gran importancia. Quizás uno de sus efectos pueda ser el convencer a los soberanos de la locura de las guerras, puesto que le resultaría imposible al más potente de ellos guardar sus dominios. Cinco mil globos, capaces cada uno de llevar a dos hombres, no costarían más que cinco barcos de línea, y ¿dónde se halla el príncipe que se permitiera el lujo de llenar su país de tropas para defenderlo, si diez mil hombres descendiendo de las nubes podrían causar un daño infinito en muchos lugares antes de que pudiera reunirse cualquier fuerza para repelerlos?".





3. HERMANOS MONTGOLFIER, Joseph-Michel (*izquierda*) y Jacques-Étienne (*derecha*), en sendos retratos del siglo XIX. En la época de sus primeros vuelos en globo, Joseph tenía 43 años y Étienne 38. El dibujo de Étienne está copiado de un retrato hecho por su hija. (Con permiso de The Granger Collection.)

El espectacular desarrollo de los vuelos en globo fue una consecuencia inevitable de un cambio drástico en la comprensión humana de la materia. En aquel entonces la única ciencia digna de tal nombre era la mecánica, especialmente la mecánica celeste, esto es, el estudio del movimiento de los cuerpos celestes. La química se hallaba liberándose del dogma de la alquimia y la biología y otras ciencias naturales se encontraban todavía en la primera etapa de observación. Era una época en que cualquier estudioso podía saber de todas las ciencias y a quien apropiadamente se le daba el nombre de filósofo natural. Cuatro de estos filósofos de la naturaleza influyeron grandemente en la invención del globo: Black, Cavendish, Priestley y Lavoisier, a todos los cuales se les calificaría hoy de químicos.

Para cualquiera que esté familiarizado con los conceptos científicos modernos, el primitivo estado de la química a comienzos del siglo XVIII resulta desconcertante. Todavía se aceptaba ampliamente la idea alquimista de que toda materia se componía de cuatro elementos terrestres: aire, tierra, fuego y agua. Esta noción simple apareció por primera vez en la *Ciencia Natural* de Aristóteles, unos veinte siglos antes, y condujo, entre otras cosas, a la creencia de que las distintas clases de materia se podrían transmutar unas en otras. Uno de sus resultados fue la búsqueda de la piedra filosofal, a la que se atribuía la capacidad de transformar el hierro y el plomo en oro. Otro descendiente de las ideas de Aristóteles, también en boga durante esa época, a saber, la teoría del flogisto, llegaría a nublar y confundir el pensamiento de la química durante la mayor parte del siglo XVIII.

La teoría del flogisto fue desarrollada para explicar la naturaleza del fuego. Desde los tiempos prehistóricos, el hombre sabía que unas sustancias ardían y otras no. Los alquimistas llegaron a observar aún más y notaron que, a un grado de calor bastante intenso, los metales comunes ardían, dejando una cal o ceniza que no lo podía hacer. ¿Por qué sucedía esto?

La explicación adelantada por Georg Stahl, en las primeras décadas del siglo XVIII, se basaba en una idea anterior de su maestro, Johann Becher. Este había aumentado los elementos aristotélicos con la inclusión de la *terra pinguis* (tierra grasienta), que, suponíase, se desprendía de una sustancia al arder. Stahl llevó este pensamiento más lejos, aseverando que un metal no era más que un compuesto de su cal y de tierra grasienta. Contemplada desde esta perspectiva, el acto de arder consistía en el desprendimiento de la tierra grasienta almacenada, a la que Stahl rebautizó con el nombre de flogisto, del griego "inflamable".

El éxito de la teoría del flogisto estu-



vo en consonancia con su versatilidad. Explicaba, por ejemplo, por qué una cal calentada con carbón podía regenerar el metal original: el carbón, sustancia inflamable, era rico en flogisto, mientras que la cal, sin aquella propiedad, no lo era. Puesto que el carbón transfería su flogisto a la cal, en consecuencia se regeneraba el metal y quedaba la ceniza del carbón. Una explicación tan satisfactoria como ésta produjo la aceptación generalizada de la teoría, y la idea del flogisto llegó a dominar el pensamiento químico durante casi un siglo.

Black, Cavendish, Priestley y Lavoisier, cuando iniciaron sus actividades científicas, eran todos partidarios convencidos del flogisto. Pero mientras que los tres primeros, ocupados preferentemente en trabajos experimentales, explicaron muchas veces los nuevos descubrimientos en términos de la teoría del flogisto, Lavoisier, sin embargo, tuvo el genio necesario para incluirlos, junto con los viejos, en un nuevo sistema químico donde no había lugar para el flogisto. Irónicamente, aunque los trabajos de Cavendish y Priestley contribuyeron más que ningún otro al derrumbamiento de la teoría del flogisto, los dos científicos siempre permanecieron fiel a ella. Priestley, aún en 1800, cuando ya se aceptaba plenamente que el oxígeno era la causa de la combustión, estaba tan convencido de sus ideas que tituló su último libro *The Doctrine of Phlogiston Established* (La doctrina del flogisto establecida).

La primera ruptura con las ideas químicas de Aristóteles provino de los experimentos de Jan van Helmont, quien dio a conocer los resultados de sus estudios a comienzos del siglo XVII. Aunque los alquimistas ya sabían que los gases se producían en reacciones tales como la fermentación y la combustión del carbón, ellos nunca los consideraron formas distintas del aire ordinario. Por medio de experimentos químicos sencillos, van Helmont obtuvo gases que podía distinguir del aire común. Les dio nombres muy gráficos tales como (traducidos) gas ventoso, gas grasiento y gas humeante. Van Helmont no realizó ninguna prueba química con estos gases, ni intentó aislarlos, pero es considerado como el introductor de la palabra "gas" en el vocabulario científico. El estudio y comprensión de los gases desarrolló una rama de la química, conocida como química neumática, de la que van Helmont ha sido considerado fundador.

4. PRIMER VUELO LIBRE TRIPULADO de un globo llenado con gas hidrógeno; partió de los Jardines de las Tullerías, en París, el 1 de diciembre de 1783. Los pasajeros fueron el físico Jacques Charles y un ayudante, M.-N. Robert. El vuelo duró cerca de dos horas, transcurridas las cuales Robert se apeó y Charles continuó solo, ascendiendo hasta una altitud aproximada de 3220 metros.

La química neumática permaneció relativamente dormida hasta mediados del siglo XVIII. Entonces, de repente, adquirió nueva vida y tomó un rumbo nuevo con resultados sorprendentes. Como dijo Torbern Bergmann, químico sueco del siglo XVIII: "Durante los últimos diez años, la química no sólo se ha elevado a las regiones de las sustancias aéreas invisibles, sino que se ha atrevido a indagar la naturaleza de estas sustancias y a investigar sus principios constituyentes". Hacia 1779, cuando estas palabras fueron escritas, ya se conocía con certeza la composición química de ocho gases.

Aunque Black, Cavendish, Priestley y Lavoisier no estuvieron estrechamente relacionados, sus contribuciones científicas se basaron unas en otras y se desarrollaron en el contexto de lo que se conoce ahora por revolución científica. La cadena de descubrimientos se inició con Black. En los años 1750, cuando era estudiante de medicina en Edimburgo, emprendió un cuidadoso examen de los gases desprendidos por la acción de los ácidos sobre la magnesia sólida (carbonato de magnesio). Su primer objetivo fue comprender las propiedades antiácidas de la magnesia, pero en el transcurso de los experimentos pudo establecer que el gas desprendido era una entidad química distinta del aire atmosférico.

Black llamó a esta nueva sustancia "aire fijo", puesto que parecía estar fijado o atrapado dentro de la magnesia. Por entonces, aún no sabía que este gas estaba compuesto de otros elementos químicos, y debieron pasar algunas décadas antes de que se le diera el nombre de dióxido de carbono, una vez conocida su composición atómica. Haciendo burbujear diversos gases a través de agua de cal y encontrando un precipitado lechoso, Black demostró que el aire fijo se desprendía en la combustión del carbón, en la respiración y en la fermentación. Black llegó a ser uno de los principales filósofos químicos de su época, ocupando su cátedra de química, primero en Glasgow y, posteriormente, a su vuelta, en Edimburgo.

Uno de los primeros científicos en examinar las propiedades del aire fijo fue Cavendish. Este era el estereotipo de los primeros filósofos naturales: rico, excéntrico e introvertido. Heredero de una gran fortuna (durante un tiempo fue considerado como uno de los hombres más ricos de Inglaterra), Cavendish eligió vivir solo y dedicarse por completo a la experimentación. En 1766 publicó tres artículos con el título de *Experiments on Factitious Air* (Experimentos sobre el aire facticio). Por aire facticio Cavendish entendía una clase de gas que estaba "contenido dentro de otros cuerpos... y se obtenía de ellos" por manipulaciones químicas. Antes de Cavendish, sólo el aire fijo de Black era considerado como facticio. Cavendish siguió el método de Black para obtener aire fijo por adición de ácido a la magnesia y amplió su trabajo al recoger muestras de gas en vejigas animales. Pesando la vejiga llena, primero con aire atmosférico y, después, con aire fijo, Cavendish descubrió que el aire fijo era 1,47 veces más pesado que el aire común.

Impulsado por la curiosidad, Cavendish fue más lejos. ¿Qué sucedería si la magnesia del experimento de Black se sustituyera por un metal común tal como el hierro? Una vez más se observaron burbujas de gas y una vez más Cavendish recogió el gas en una vejiga. Sin embargo, este gas facticio no originaba ningún precipitado en el agua de cal y resultaba ser 11 veces más ligero que el aire. Además, en vez de apagar una llama como lo hacía el aire fijo, producía una explosión cuando se colocaba una llama cerca de él. Evidentemente, Cavendish había descubierto un segundo gas facticio, al cual bautizó apropiadamente con el nombre de "aire inflamable".

Los trabajos de Black y Cavendish dejaron sentado firmemente que los gases eran entidades químicas distintas. Ya no fue posible considerar al aire como una de las partes constituyentes elementales de la materia. Pero, ¿qué decir respecto de la tierra, el fuego y el agua?

Por aquella época, Lavoisier, joven aristócrata francés, acometió la realización de un experimento sencillo que eliminó a la "tierra" como sustancia elemental. Un antiguo experimento, que sugería esto último, consistía en calentar agua durante un largo período de tiempo en un "pelícano" (parecido a una retorta) herméticamente cerrado. Al final, un pequeño residuo sólido era visible en el fondo del recipiente. Este experimento había sido interpretado como la conversión del agua en "tierra".

Lavoisier decidió someter a prueba con la balanza química la interpretación aceptada de este experimento. Pesó el pelícano vacío y le añadió agua destilada. Después de cerrarlo herméticamente, anotó el peso del recipiente lleno y, por sustracción, dedujo el peso del agua. A continuación, mantuvo el agua hirviendo lentamente durante 101 días. Al final del experimento, pesó de nuevo el pelícano, tanto lleno como vacío. El peso conjunto no había cambiado, pero había aparecido un residuo sólido cuyo peso era igual al peso perdido por el recipiente vacío. Obviamente, la "tierra" procedía, por disolución, del vidrio del pelícano y no del agua. Junto con la obra de Black y Cavendish, el experimento de Lavoisier puso seriamente en tela de juicio la teoría alquimista aristotélica.

El desarrollo final de esta revolución científica giró en torno a nuevos descubrimientos en química neumática realizados principalmente por Priestley. Este fue un hombre de diversos talentos e intereses. Formado como clérigo noconformista, desempeñó varias profesiones, incluidas las de publicista, escritor (de 106 libros) y químico. En 1772 publicó un artículo titulado *Observations of Different Kinds of Air* (Observaciones sobre diferentes clases de aire), donde describía la preparación de varios gases nuevos. En la década siguiente, la que precisamente precedió a la invención del globo, Priestley añadió ocho gases más a su lista de descubrimientos.

En el fondo, el éxito de Priestley descansaba en un mayor perfeccionamiento de la técnica para recoger gases. Con anterioridad, los químicos recogían los gases haciéndolos burbujear en una campana llena de agua, que había sido cuidadosamente invertida y colocada en un recipiente de poco fondo con agua. Como el gas se reunía en la parte alta de la campana invertida, el agua se desplazaba desde ésta al recipiente. Sin embargo, si un gas era soluble en agua no se podía recoger por medio de esta técnica. Por el simple recurso de sustituir al agua por mercurio, Priestley pudo así recoger y analizar muchos gases nuevos.

El más importante descubrimiento de Priestley tuvo lugar en 1774. Con luz solar y una lupa de 304 milímetros calentó el precipitado rojo de mercurio, una sustancia de consistencia pulverulenta largamente conocida por los alquimistas, y, tal como Black había observado en la combustión del carbón, se obtuvo un gas, pero que no era el aire fijo. En efecto, este gas tenía unas propiedades notables totalmente propias: hacía que una llama ardiera con más brillo y que un ratón encerrado en su seno viviera aproximadamente dos veces más tiempo que si lo hacía en la misma cantidad de aire atmosférico. Puesto que Priestley concebía la combustión en el contexto de la teoría del flogisto, era natural que interpretara estas propiedades en función de dicha teoría. Recordemos que se suponía que el flogisto se desprendía de una sustancia cuando ésta ardía. Y puesto que tendría que ir a alguna parte, Priestley pensó que iría al nuevo gas. De este modo, el gas debía ser deficiente en flogisto y, por ello, Priestley le llamó "aire deflogisticado". Este nombre estuvo destinado a tener una vigencia efímera. Pronto, en el laboratorio de Lavoisier, el gas recibiría el nombre de oxígeno y desempeñaría el papel de la piedra angular de la moderna teoría quimica.

Fue por esta época cuando Lavoisier comenzó a cuestionarse seriamente la teoría del flogisto. En 1772 preparó una memoria sobre la combustión del azufre y del fósforo en el seno del aire. Haciendo uso nuevamente de la balanza, determinó que ambas sustancias ganaban peso al arder. Atribuyó este aumento a la combinación con el aire. En su memoria, Lavoisier llegó a conjeturar que "lo que se observa en la combustión del azufre y del fósforo puede tener lugar muy bien con todas las sustancias... y estoy persuadido de que el aumento de peso de las cales metálicas se debe a la misma causa". De acuerdo con esta conjetura, Lavoisier encontró, al calentar la cal de plomo (óxido de plomo) con carbón, que "en el momento en que la cal se transformaba en metal, se desprendía una gran cantidad de gas". Estas observaciones y conjeturas estaban en completa contradicción con la teoría del flogisto, la cual daba por supuesto que el flogisto abandonaba la sustancia cuando ésta ardía, acompañándose el proceso con una pérdida de peso. El joven Lavoisier, consciente de la herejía de sus ideas, introdujo la memoria en un sobre sellado y la depositó en la Academia Francesa, para así asegurarse la prioridad en el caso de que estas ideas revolucionarias fueran apoyadas por trabajos posteriores.

5. JOSEPH BLACK (1728-1799) inició la cadena de descubrimientos que condujo a la invención del globo. En el ecuador del siglo, cuando aún era estudiante de medicina en Edimburgo, identificó al gas desprendido por la acción de los ácidos sobre la magnesia como una entidad química distinta del aire atmosférico. La nueva sustancia, a la que llamó "aire fijo", fue conocida más tarde como dióxido de carbono. Este grabado sobre acero es una copia del retrato pintado por Sir Henry Raeburn.

La madurez de pensamiento de Lavoisier sobre la combustión y su teoría sobre ella aparecieron en su famosa memoria de 1783 *Réflexions sur le phlogistique* (Reflexiones sobre el flogisto). Allí presentaba un compendio de sus muchos argumentos frente a la validez de la teoría del flogisto. Tan evidente era para él, que dejó escrito: "mi único objeto en esta memoria es ampliar la teoría de la combustión que había anunciado en 1777; mostrar que el flogisto de Stahl es un ente imaginario; que su existencia en los metales, en el azufre, en el fósforo y en todos los cuerpos combustibles es una suposición carente de fundamento y que todos los hechos de la combustión y de la calcinación se explican de una forma más fácil y más sencilla sin él".

La explicación de Lavoisier fue, en efecto, sencilla. No era flogisto lo que se desprendía durante la combustión de una sustancia, sino que era el oxígeno del aire lo que se combinaba con ella. La hipótesis de Lavoisier podía explicar todos los hechos relacionados con la combustión, incluidos los cuantitativos, como el hecho de que el peso ganado por una sustancia en la combustión fuera precisamente igual al peso de gas oxígeno desaparecido.



6. HENRY CAVENDISH (1731-1810) investigó las propiedades del aire fijo y de otra clase de "aire facticio" al que llamó "aire inflamable". A esta última sustancia, que resultó ser 11 veces más ligera que el aire atmosférico, se le dio más tarde el nombre de hidrógeno. Este grabado, obra de W. Alexander, constituye el único retrato contemporáneo de Cavendish que se conoce. Se halla en el British Museum.

Por aquel entonces, los resultados de la investigación en química neumática se difundían ampliamente. Se realizaron grandes progresos en la comprensión de la materia y se descubrieron nuevos gases con propiedades poco comunes. Priestley, basándose en su familiaridad con las propiedades del aire fijo de Black, lo disolvió en agua y halló que la bebida resultante era muy agradable de tomar. La nueva "agua de soda" triunfó rápidamente en la sociedad europea. Los hermanos Montgolfier también adquirían conocimientos en los trabajos sobre los gases y los aplicaban a sus ideas sobre los globos. Pero se necesitó un nuevo impulso para colocar en la misma senda a la revolución científica y al globo.

La pieza final del rompecabezas fue descubierta en Inglaterra. Cavendish comenzó a utilizar el método de la chispa eléctrica de Priestley para examinar los nuevos gases. Cavendish estaba particularmente interesado en aquel gas liviano al que había dado el nombre de gas inflamable y fue sometiendo a la acción de la chispa eléctrica diversas mezclas de ese gas y aire común. La chispa producía una llama azulada acompañada de una contracción del volumen de gas y la formación de una especie de rocío.

Este rocío atrajo la atención de Cavendish y diseñó un segundo experimento para recoger una cantidad mayor. Esta sustancia, escribió, "no tiene sabor ni olor y... no deja ningún sedimento apreciable cuando se evapora a sequedad; tampoco se produce un olor picante durante la evaporación; en definitiva, parece que es agua pura". En efecto, nuevos exámenes probaron la veracidad de este aserto.

Este famoso experimento se terminó en 1781, pero no fue comunicado a la Royal Society hasta 1784. Fundamentalmente, su publicación formal se demoró porque Cavendish deseaba investigar todavía el hecho de que cuando el aire desflogisticado se sustituía, en este experimento, por el aire común, el agua obtenida era ácida. Encontró que la causa de esta acidez se debía al ácido nítrico, cuya composición estableció.

Cavendish había demostrado que el agua se obtenía a partir del aire inflamable y el deflogisticado por medio de la ignición de una mezcla de ambos gases. Este hallazgo no significó para él que el agua fuera un compuesto de hidrógeno y oxígeno. ¡Cómo lo iba a ser para un convencido partidario de la teoría del flogisto! Escribió: "Existe una poderosa razón para pensar que el aire deflógisticado es solamente agua desprovista de flogisto, y que el aire inflamable, como se ha dicho anteriormente, puede ser tanto agua flogisticada como flogisto puro, pero con toda probabilidad lo primero". En otras palabras, Cavendish creía que el agua existía como tal agua en cada uno de los dos "aires" y que la reacción entre ellos la liberaba. En este proceso, el flogisto se transfería del aire inflamable, rico en flogisto, al aire deflogisticado, pobre en flogisto.

El 12 de noviembre de 1783, Lavoisier leyó en una sesión pública de la Academia una memoria con el largo título de *Mémoire dans lequel on a pour*

objet de prouver que l'eau n'est point une substance simple, un élément proprement dit, mais qu'elle est susceptible de décomposition et de recomposition (Memoria que tiene por objeto probar que el agua no es una sustancia simple, un elemento propiamente dicho, sino que es susceptible de descomposición y de recomposición). Aunque los métodos y los resultados fueron inferiores a los de Cavendish, Lavoisier fue lo suficientemente audaz para dar el salto y aseverar que el agua era un compuesto de oxígeno e hidrógeno. Lavoisier también ideó un ingenioso experimento que demostraba que el agua se podía descomponer en sus elementos constituyentes. Su idea explotaba el hecho de que cuando el vapor de agua reaccionaba con hierro al rojo (para ello utilizó el cañón de un arma), el agua se descomponía para formar hidrógeno y óxido de hierro. Solamente al descubrir, con una experiencia paralela, que el cobre calentado al rojo no reaccionaba con el agua, fue cuando pudo realizar el experimento que andaba persiguiendo.

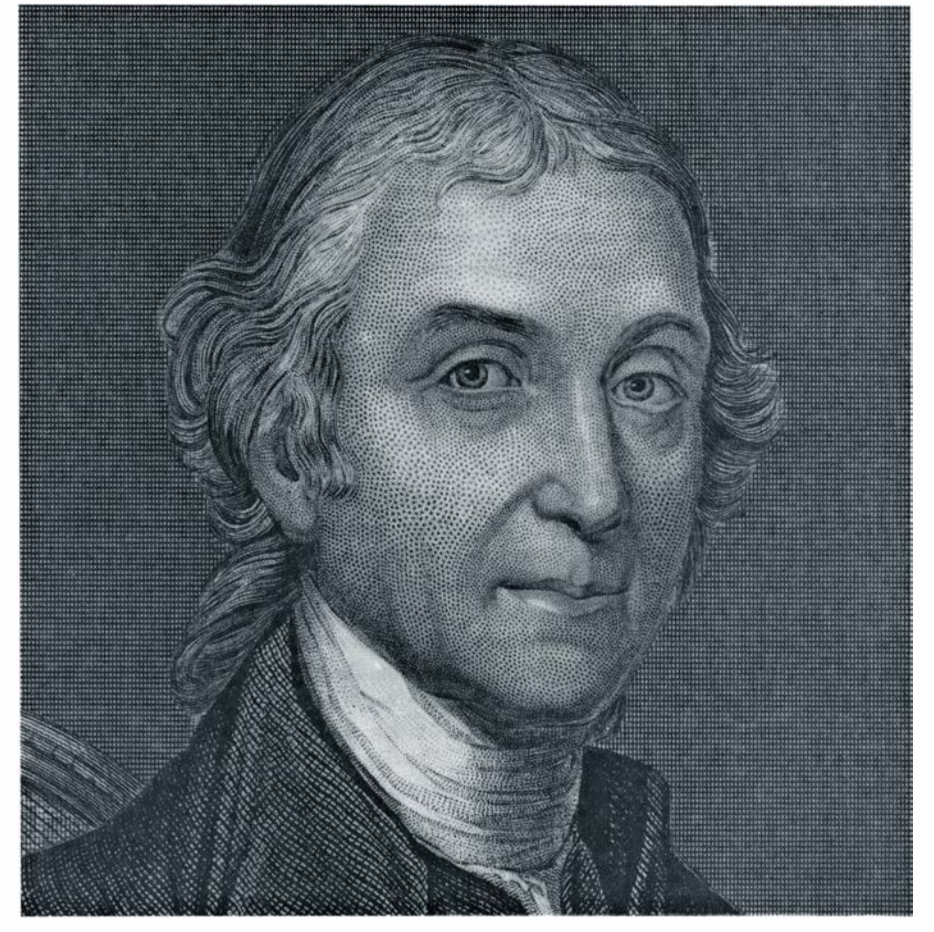
El experimento satisfactorio consistió en montar un tubo de cobre en cuyo interior había colocado trocitos de hierro. Una muestra, pesada previamente, de agua se hizo pasar a través del tubo calentado al rojo. El vapor que quedaba sin descomponer se condensaba y se pesaba; la fracción gaseosa (hidrógeno) se recogía en agua y se medía; finalmente, el hierro colocado dentro del tubo de cobre se volvía a pesar para determinar su ganancia de peso. A partir de esta experiencia, Lavoisier concluyó que el agua se componía de una parte de hidrógeno y seis partes y media de oxígeno, en peso (el valor correcto es 1:8). Estas gráficas demostraciones de que el agua se podía descomponer y recomponer de nuevo encajaban tan perfectamente dentro de la concepción de la naturaleza de Lavoisier, que derribaron de un golpe la teoría del flogisto. Mucho más que eso, el experimento marcó el final de los cuatro elementos aristotélicos.

Alentado por el éxito de su interpretación de este experimento, Lavoisier se halló dispuesto para construir un nuevo y más lógico sistema de química. Y lo hizo seguidamente con la publicación, en 1789, de su *Traité élémentaire de chimie*. En él, tanto el oxígeno como el hidrógeno aparecían incluidos en la lista de 33 elementos, todos los cuales, menos dos, se pueden encontrar en la moderna tabla periódica de los elementos. La publicación del libro significó el comienzo de la revolución científica y el nacimiento de la química moderna.

Si volvemos a la historia de las primeras ascensiones en globo, el efecto que tuvo la revolución química sobre los vuelos en globo y, particularmente, sobre los globos llenados con hidrógeno, parece obvio. Hasta la interconexión entre ambos esfuerzos es profunda. Aunque la historia del globo de hidrógeno comenzó en el laboratorio de Cavendish, donde éste preparó por primera vez el aire inflamable y estableció que era mucho más ligero que el aire atmosférico, sería Black quien utilizaría el descubrimiento para demostrar por primera vez la posibilidad de producir un objeto mucho más ligero que el aire. La siguiente narración de Thomas Thomson, el distinguido químico que sucedió a Black en Glasgow, nos muestra el sencillo logro de Black:

"Inmediatamente después de la aparición del artículo de Cavendish sobre el gas hidrógeno, donde éste hacía una aproximación a la gravedad específica de ese cuerpo mostrando que era, al menos, diez veces más ligero que el aire atmosférico, el Dr. Black invitó a cenar a un grupo de sus amigos informándoles que tenía algo curioso que enseñarles. El Dr. Hutton, Mr. Clarke de Elden y Sir George Clarke de Pennicuik se encontraban en ese grupo. Cuando estuvieron reunidos, los introdujo en una habitación. Allí tenía el alantoides (la delgada membrana fetal) de un cordero lleno de gas hidrógeno; una vez puesto en libertad, ascendió inmediatamente y se adhirió al techo. El fenómeno fue explicado fácilmente: se daba por sentado que un pequeño hilo negro estaba atado al alantoides, que este hilo pasaba a través del techo y que alguien situado en la habitación de arriba, tirando del hilo, lo elevaba hasta el techo. Esta explicación parecía tan probable que fue aceptada por la totalidad del grupo. Coherente como cualquier otra teoría plausible, resultó infundada; cuando el alantoides cayó al suelo, ningún hilo se hallaba atado a él".

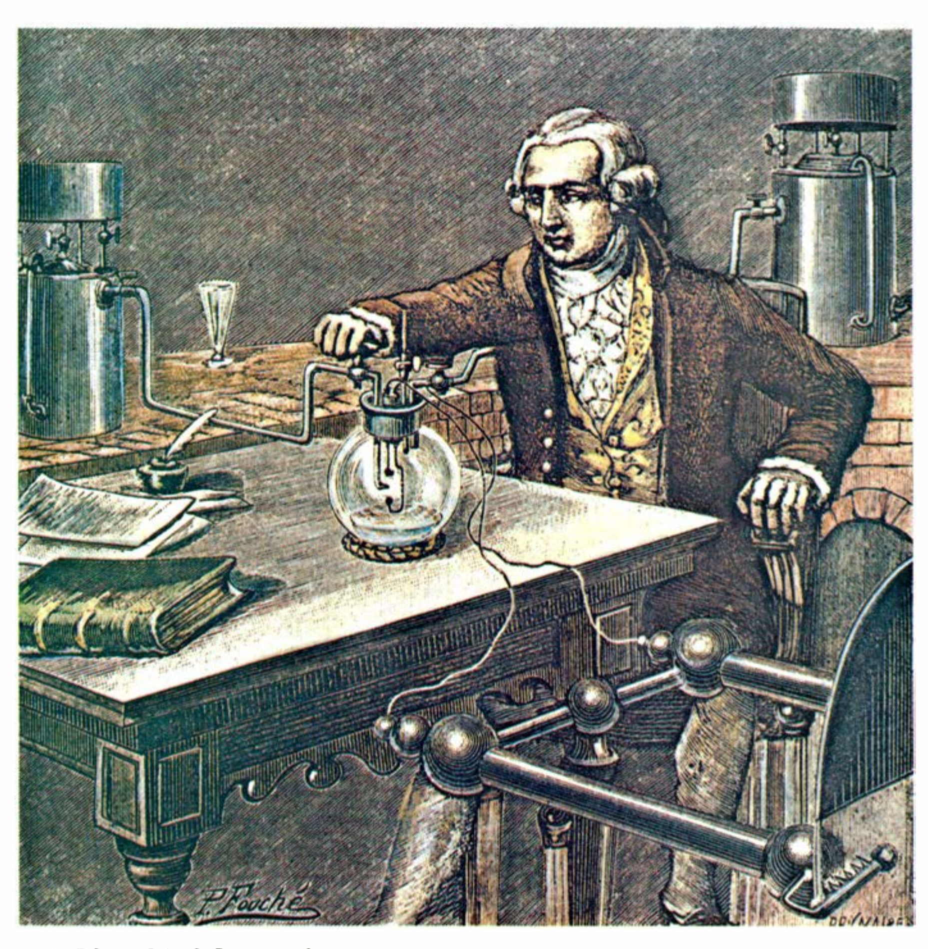
Años más tarde, en 1784, Black escribió una carta dando cuenta de lo que cruzaba por su mente: "Como usted habla del 'nacimiento' de los ensayos aerostáticos", decía, "le ruego me permita comunicarle más detalladamente lo que pienso sobre este tema. En primer lugar, aunque toda la información que ya le he dado sobre ello es absolutamente cierta, no pretendo reclamar para mí la invención de las máquinas para realizar vuelos y excursiones. El



7. JOSEPH PRIESTLEY (1733-1804) logró aislar ocho gases más en la década que precedió a la invención del globo. Hombre de múltiples talentos, partidario de la teoría del flogisto sobre la combustión, Priestley identificó al más importante de sus descubrimientos –el oxígeno– como "aire deflogisticado".

ensayo con la vejiga, que propuse como un ejemplo llamativo del descubrimiento de Cavendish, era tan obvio que cualquier persona podía haberlo imaginado; pero, ciertamente, nunca pensé construir grandes vejigas artificiales, ni estas pesadas máquinas elevadoras, ni tampoco transportar hombres por el aire. No tengo la menor sospecha de que esto se hubiera imaginado en cualquier parte antes que nosotros comenzáramos a saber que se estaba intentando hacer en Francia, y no dudo de que lo que se ha publicado en los periódicos no sea perfectamente cierto, v. g., que Mons. Mongolfier (*sic*), hace algún tiempo, había concebido la idea de volar en el aire con una gran bolsa o globo de aire común, rarificado por la simple aplicación del fuego o una llama.

"Por estar la idea fundada sobre un principio ampliamente conocido, sin conexión con el descubrimiento de Cavendish, lo único sorprendente es que Mongolfier no la haya puesto antes en práctica. Supongo, por tanto, que por muy firme que él formase su proyecto mucho tiempo antes, nunca se animó a llevarlo a la práctica realizando una travesía, hasta que otros comenzaron a pensar en volar por medio del aire inflamable. Quien primero ideó el procedimiento, yo no lo puedo decir, porque confieso que no he leído la historia de los ensayos; nunca me interesaron lo más mínimo".



8. ANTOINE LAVOISIER (1743-1794) aparece en este grabado del siglo XIX, retocados los colores a mano, realizando un experimento diseñado para determinar la composición del agua por medio de la ignición de una mezcla de hidrógeno y oxígeno con una chispa eléctrica. Refutó de un modo definitivo la teoría del flogisto sobre la combustión y estableció la verdadera naturaleza compuesta del agua. También desempeñó el principal papel en la planificación y en los informes de los primeros ensayos con globos, formando parte de una comisión nombrada con esa finalidad por la Academia de Ciencias Francesa.

¿Qué conjeturas condujeron a los hermanos Montgolfier a realizar sus ensayos con globos de aire caliente? Este interrogante es más difícil de responder; cuanto se puede decir al respecto pertenece al ámbito de la especulación. James Glaisher, en la edición de 1878 de la *Encyclopaedia Britannica*, escribió: "Los hermanos Montgolfier imaginaron que el globo ascendía merced a la ligereza del humo y otros vapores producidos por el fuego de paja, y no fue hasta algo más tarde cuando reconocieron que el poder ascendente se debía simplemente a la ligereza del aire caliente comparada con la de igual volumen de aire a menor temperatura." Evidentemente, los hermanos Montgolfier tenían la impresión de que los vapores producidos por la paja eran aire inflamable o algo similar. Black, sin embargo, sí lo sabía bien. Dejó claro en su carta que el aire más caliente estaba sencillamente "rarificado".

Existe otra prueba de que los hermanos Montgolfier, en la época de sus ensayos, operaron con una concepción errónea de la naturaleza del humo y demás vapores producidos por el fuego. En la correspondencia de Sir John Sinclair, un abogado que tuvo una participación activa en la política inglesa de su época, se puede encontrar la siguiente narración: "Hacia finales de 1785, se dieron determinadas circunstancias que me indujeron a realizar un corto viaje desde Londres a París, y, accidentalmente, fui en compañía de tres distinguidos extranjeros, a saber, Argand, tan conocido por sus logros en el arte de construir lámparas; Reveillon, el principal manipulador del papel entonces conocido... y [Joseph] Montgolfier, tan famoso por su descubrimiento de los globos. Pude obtener mucha información de la conversación de estos hombres inteligentes; y recuerdo, en particular, que el último ofreció una panorámica del origen de su descubrimiento, del cual, lo que sigue, es el meollo.

"Montgolfier dijo que él y su hermano eran fabricantes de papel en Languedoc y que siempre habían sentido una poderosa atracción por las cuestiones químicas. Por consiguiente, se habían preocupado de obtener toda la información relacionada con estos temas. Parece que Montgolfier y su hermano había hablado de la posibilidad de elevarse en el aire ellos mismos o de enviar grandes cuerpos desde la tierra; sin embargo, en esa primera época, aún no habían hecho ningún experimento que probara si la idea era o no viable; después de leer un compendio de algunos experimentos de Black, donde se explicaba la naturaleza de varias clases de aires o gases, y, en particular, sus diferencias en peso, inmediatamente le dijo a su hermano, 'Parece que la posibilidad de efectuar aquello de que hablamos hace algún tiempo ha sido demostrada por un químico extranjero'. El punto significativo que deberá ser generalmente conocido es este, que si no hubiese sido por el descubrimiento del Dr. Black, probablemente los dos Montgolfier nunca hubieran acometido ningún ensayo. Esto lo asevero basándome en el testimonio del mayor de los Montgolfier, quien fue uno de los hombres más honestos y de más talento de todos los que me he tropezado, y quien siempre mencionó al Dr. Black con el respeto que merecía".

Juegos de ordenador

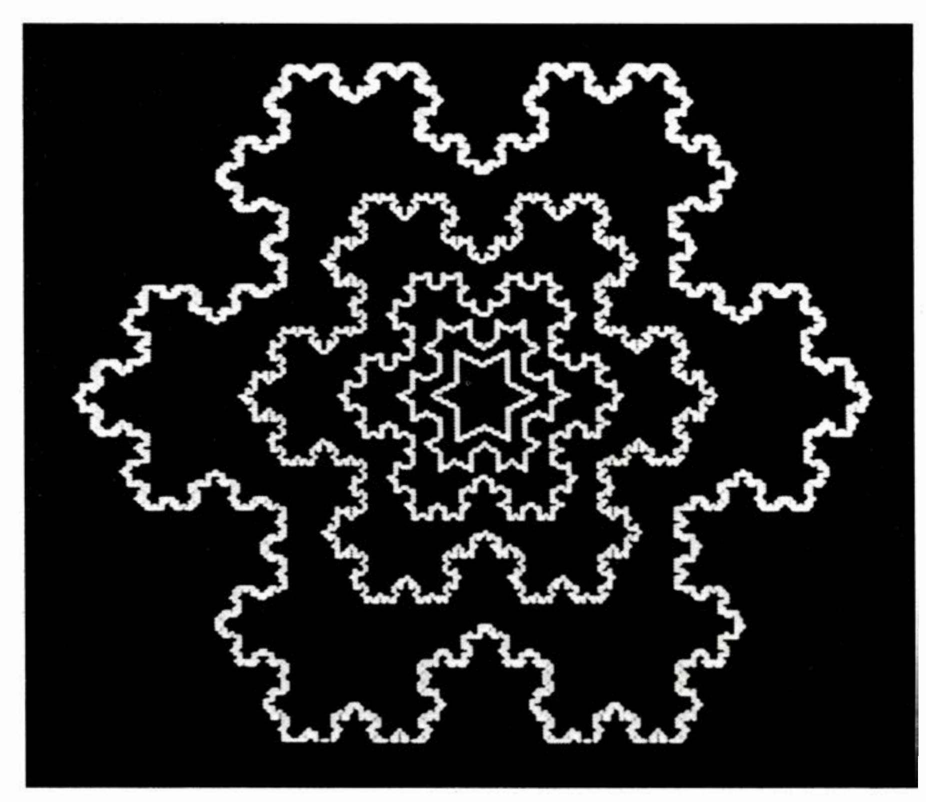
La tortuga y sus giros nos permiten ver la geometría desde el interior

Brian Hayes

¿Qué es una circunferencia? ¿Es el caso límite de un polígono *n*-látero cuando *n* tiende a infinito? ¿Es el caso particular de elipse cuyos dos focos se han confundido en uno? ¿Es el lugar geométrico de los puntos de un plano equidistantes de uno fijo dado?

Claro está que todas estas definiciones son correctas; podrían darse más. Fijémonos en esta otra: una circunferencia es la figura que se forma al avanzar un poquito, girar ligeramente hacia la derecha, e ir repitiendo estos dos pasos hasta completar exactamente 360 grados. Esta última definición es característicamente distinta de las otras. En lugar de dar una descripción de la circunferencia, o enunciar alguna de sus propiedades, aporta un procedimiento para construirla. Además, el procedimiento mismo es de naturaleza especial: su enunciado se basa enteramente en "propiedades locales" de la curva. Podemos crearla atendiendo solamente a nuestro más inmediato entorno; no se requiere una visión de conjunto; no es preciso saber dónde se encuentra el centro de la circunferencia; ni siquiera es preciso determinar el radio.

Procedimientos de esta naturaleza constituyen la esencia de una nueva forma de pensar en geometría. Se la ha llamado geometría experiencial, porque nos sentimos invitados a imaginarnos en movimiento por el mundo de las figuras geométricas, mientras que otros enfoques de la geometría tienden a situar aparte las figuras, en un espacio separado e independiente del observador. La diferencia viene a ser la que media entre la exploración de un paisaje y la consulta de un mapa. El enfoque experiencial se adapta particularmente bien a la investigación de ideas geométricas con auxilio de ordenador. Las definiciones procedimentales pueden fácilmente traducirse en programas, que al ser ejecutados van trazando las formas especificadas.



1. Serie de "copos de nieve" encajados, trazados por la tortuga

La nueva forma de imaginar la geometría ha dado en ser conocida por "geometría de la tortuga", y se encuentra íntimamente ligada al lenguaje de programación llamado Logo, cuyas raíces, a su vez, se hunden en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). El lenguaje Logo fue ideado hace unos veinte años por Seymour Papert, del MIT, con la finalidad primordial de servir de vía de aproximación de los niños a los ordenadores. Muchos otros han contribuido desde entonces a su desarrollo y sus aplicaciones, tanto en el educativo, como en otros campos. Entre ellos se cuentan Harold Abelson y Andrea A. diSessa, del MIT, quienes han presentado las ideas subyacentes a la geometría de la tortuga en una obra de carácter expositivo de notable valor, *Turtle Geometry: The Computer as a Medium for Exploring Mathematics*.

La tortuga primitiva era un dispositivo mecánico, un diminuto vehículo de ruedas, cuyo movimiento podía controlarse mediante instrucciones dactilografiadas en el teclado de un ordenador. La primera de tales criaturas la construyó, a fines del decenio de 1940, el neurofisiólogo británico W. Grey Walter; su cubierta tenía forma de domo, que recordaba un poco el caparazón de una tortuga. La tortuga mecánica puede avanzar o retroceder, y puede cambiar de dirección, girando sobre su mismo lugar. Podemos montar una pluma en su chasis, y así, cuando la hagamos ir de uno a otro lado sobre una hoja de papel, dejará en ella un registro de su trayectoria. En nuestros días, esas "tortugas terrestres" son mucho menos corrientes que las de "pantalla", que se desplazan y dibujan sobre la superficie de un iconoscopio. La tortuga misma queda representada en la pantalla por una sencilla figura triangular, que se mueve obedeciendo órdenes o programas mecanografiados en el teclado.

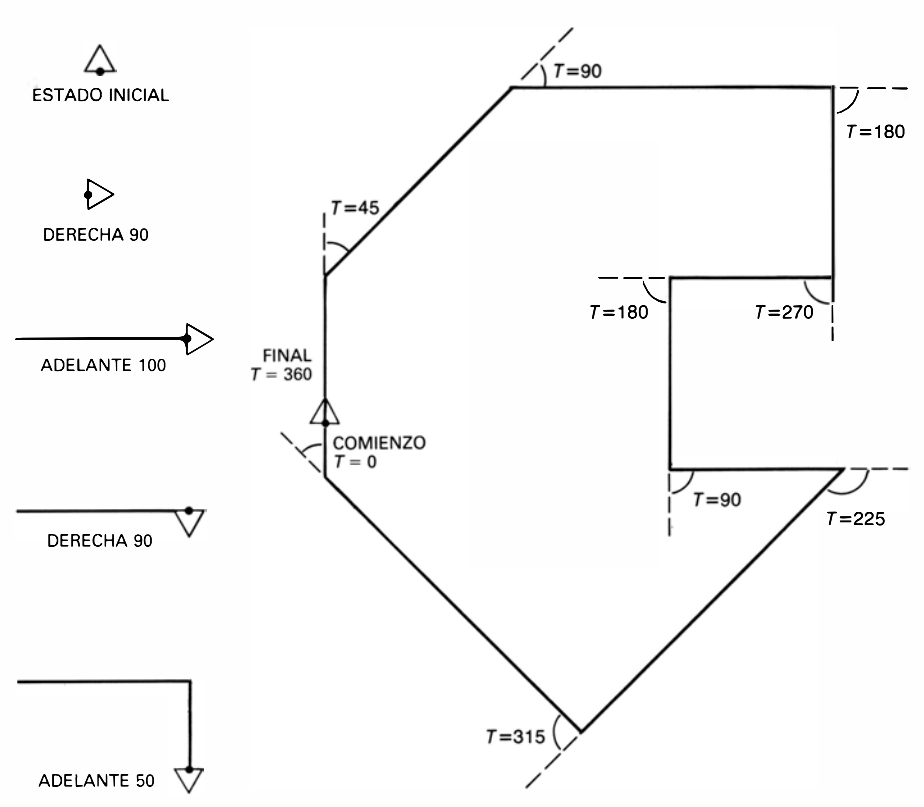
Casi todos los métodos de dibujo con ordenador se valen de un sistema global de coordenadas, por lo general cartesianas, de ejes perpendiculares. La situación de cada punto de la pantalla se define con respecto a un cierto origen, el ángulo inferior izquierdo, por ejemplo, en el cual se cortarían unos imaginarios ejes. Las direcciones en el plano tienen también carácter absoluto. La

instrucción de dibujar una recta podría concretarse en dar sus dos extremos; por ejemplo, al dar el par de puntos {0, 0} y {100, 0} podría quedar dibujada en la parte inferior de la pantalla una recta horizontal de longitud 100 unidades.

Es preciso subrayar que en todo sistema de coordenadas globales, el efecto de una instrucción no depende de la sucesión de órdenes que la precedieron. En el sistema de la geometría de la tortuga la situación es completamente distinta. Podemos dibujar una recta de 100 unidades dando a la tortuga una instrucción como ADELANTE 100. El lugar de la pantalla donde quede trazada la recta, así como su orientación, dependerán por completo del estado de la tortuga en el instante en que se le dio la orden. En cada momento la tortuga ocupa una posición, y enfila en una dirección. La instrucción ADELANTE 100 la hace avanzar 100 unidades contadas desde su posición actual, y en la dirección definida por su orientación presente (es decir, por la dirección "en que está mirando"). Por eso, una misma instrucción tiene consecuencias muy distintas al darla en un estado inicial diferente.

Bastan dos órdenes, a saber, ADELANTE y DERECHA, para crear un sistema geométrico muy sencillo basado en la tortuga. La instrucción ADELANTE va seguida de un número que especifica cuántos "pasos" ha de dar la tortuga. También DERECHA va seguida de un valor numérico: los grados que ha de virar la tortuga hacia la derecha, con respecto a la dirección en que actualmente apunta. Mediante una secuencia apropiada de avances y giros a la derecha puede dibujarse cualquier figura plana. (Observemos que un giro de 90 grados hacia la izquierda tanto puede definirse DERECHA 270 como DERECHA −90.) Empero, los sistemas prácticos de tortugas suelen contar también con instrucciones ATRAS, IZQUIERDA, y órdenes como PLUMA y SIMPLUMA, que determinan si la tortuga ha de trazar o no la línea que describe. Por lo general, se dispone también de otras instrucciones que dan cuenta del estado de la tortuga, y que ofrecen medios para especificar coordenadas absolutas, aunque para la geometría de la tortuga su papel no es esencial.

El tipo de geometría que se lleva a la práctica con la tortuga se llama, formalmente hablando, geometría diferencial finita. Es finita, porque la tortuga sólo puede moverse a pasos discretos. Es diferencial, porque todos los movimientos se definen a partir de la diferencia entre la posición y orientación actuales y las sucesivas inmediatas. Lo que no es sino otra forma de decir que es un tipo de geometría que se ocupa únicamente de las propiedades locales de rectas, curvas y superficies: no hay referencia a puntos lejanos ni a propiedades globales de las figuras geométricas. Se sigue que la geometría de la tortuga es de la máxima utilidad para explorar las propiedades "intrínsecas" de las figuras, es decir, las definidas enteramente en el seno de las mismas.



2. *Algunas de las instrucciones que obedece la tortuga (***izquierda***) y noción de giro total (***derecha***)*

Una idea que puede resultar de tortuosa expresión en un sistema de coordenadas, si bien se presenta claramente en la geometría de la tortuga, es la noción de curvatura. En coordenadas cartesianas, la curvatura de una línea plana puede definirse a partir de la tasa de variación de la pendiente de la línea; la pendiente, a su vez, puede definirse como la tasa de variación de la ordenada, y, de los puntos de la curva, al expresarla en función de la abscisa, x. La tortuga permite expresar la curvatura de un modo mucho más sencillo: es el giro total por unidad de distancia recorrida. Por tanto, en una circunferencia definida por repetición de las instrucciones ADELANTE 1, DERECHA 1, la curvatura es, por doquier, igual a 1.

La noción de giro total conduce a otros interesantes hallazgos. Fijémonos en los conocidos teoremas de la geometría euclídea relativos a la suma de los ángulos interiores de un polígono convexo. Para triángulos, la suma es de 180 grados; para cuadriláteros, 360; para pentágonos, 540; y así sucesivamente. Dicho sin rodeos, la suma de los ángulos interiores es invariablemente múltiplo entero de 180 grados; y ese entero es dos unidades menor que el número de lados. El giro total de la tortuga se mide a partir de un ángulo distinto, que no es ni el ángulo interior ni el exterior, sino el cambio de orientación en cada vértice. Pueden igualmente enunciarse teoremas relativos al giro total en un polígono; son un tanto diferentes de los enunciados para el ángulo interior; son también de carácter más general.

El más fundamental enuncia que cuando la tortuga traza un polígono, el ángulo girado total ha de ser múltiplo entero de 360 grados. La demostración es sencilla y transparente. Si una figura es cerrada (y todo polígono lo es), la tortuga ha de acabar retornando al punto de partida; cuando llegue a él, su orientación habrá de ser precisamente la misma que la inicial. (De hecho, esta observación permite una definición efectiva de figura geométrica cerrada.) Ahora bien, si las orientaciones inicial y final son iguales, el giro

total habrá sido de cero grados, o 360 grados, o algún múltiplo de 360 grados.

Para polígonos convexos puede demostrarse un resultado más potente, a saber, que el giro total es precisamente de 360 grados. (Un polígono es convexo si ningún segmento rectilíneo que conecte dos puntos yacentes sobre sus lados sale del polígono.) El teorema propiamente dicho, por otra parte, es válido para polígonos cualesquiera, incluidos polígonos no convexos, como puede ser la estrella pentagonal; es válido incluso para figuras cerradas que tengan lados curvos, y que por consiguiente no son polígonos.

En la geometría de coordenadas, el ángulo interior total de los polígonos convexos apenas si tiene vías obvias de conexión con otras ideas. En la geometría de la tortuga, sin embargo, la noción de giro total es poderoso instrumento, fecundo en aplicaciones. Por ejemplo, Abelson y diSessa muestran que puede utilizarse para analizar la topología de caminos cerrados. Los caminos que en topología se llaman simples pueden tener cualquier número de lados, curvas y convoluciones, con tal de que no se corten a sí mismos; en ellos, al igual que en los polígonos convexos simples, el giro total es de 360 grados. Al añadirle al camino un único bucle (más un único cruce simple consigo mismo), el giro total resulta ser cero o 720 grados, dependiendo de a qué mano esté orientado el bucle. Cada bucle adicional añade o resta otro incremento de 360 grados. A causa de esta propiedad, la topología del camino puede determinarse a "ojo de tortuga", a pesar de que en cada instante tan sólo se ve una porción microscópica del mismo.

También es el giro total fundamento de un algoritmo que permite a la tortuga dar con la salida de cualquier laberinto. Veamos cómo enuncian Abelson y diSessa el procedimiento:

"1. Se selecciona una dirección inicial arbitraria, que se llamará 'norte'. Se orienta la tortuga en esa dirección.

"2. Se hace avanzar la tortuga en línea recta con dirección norte, hasta que tropiece con un obstáculo.

"3. Se gira hacia la izquierda hasta que el obstáculo se encuentra exactamente a la derecha.

"4. Se va contorneando el obstáculo, manteniéndolo siempre a mano derecha, hasta que el giro total (contado el giro inicial del paso 3) sea igual a cero.

"5. Se retorna al paso 2."

Gracias a este procedimiento, la tortuga puede resolver cualquier laberinto "que juegue limpio", esto es, que tenga realmente una salida. El procedimiento tiene que funcionar, porque la única forma de dejar atrapada a la tortuga es obligarla a ir trazando un bucle sin fin; al llevar control del giro total, se elude caer en la trampa. Observemos nuevamente cómo un problema global –encontrar una ruta de salida del laberinto– ha quedado resuelto a pesar de que la información de que la tortuga pueda disponer se refiere exclusivamente a su inmediatez local; no es una vista aérea del laberinto. El procedimiento universal de resolución de laberintos se conoce por algoritmo de Pledge, en honor de John Pledge, un inglés de Exeter que lo ideó a la edad de 12 años.

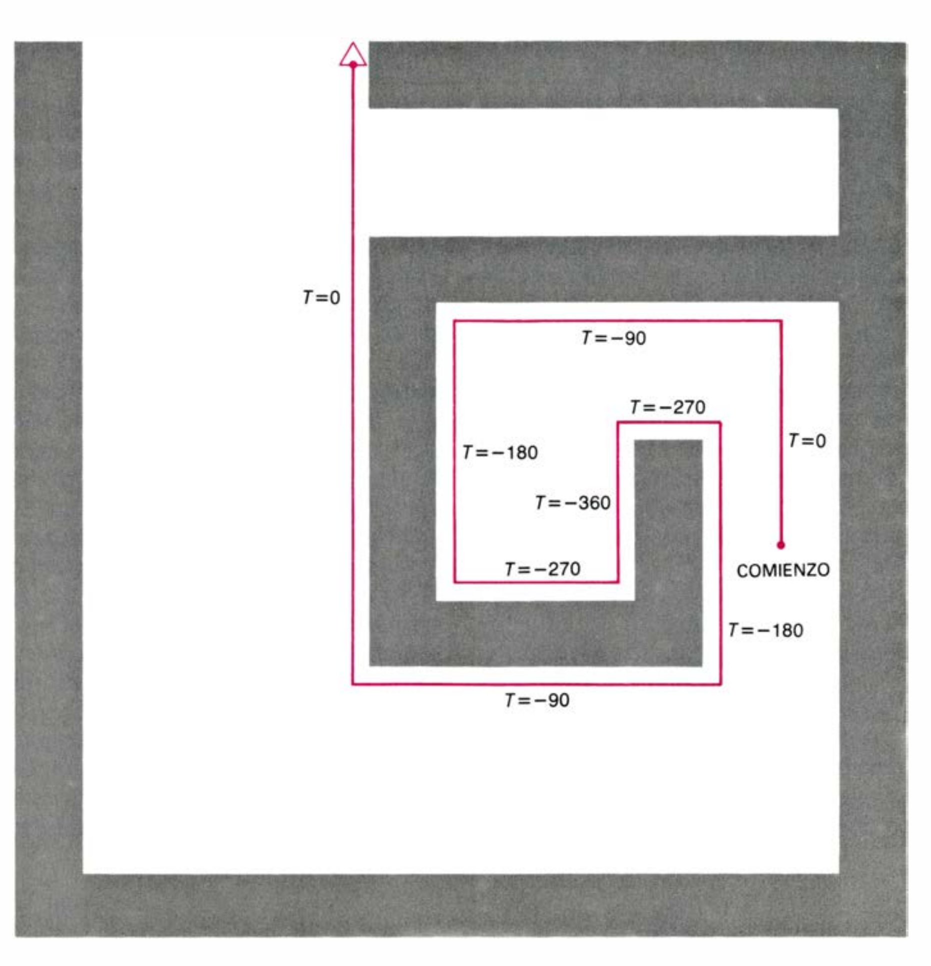
Todavía se presentan más aplicaciones de la noción de giro total al hacer que la tortuga se pasee por superficies

3. La topología de curvas cerradas, deducida del giro total

no planas. Por ejemplo, al describir sobre una esfera un circuito cerrado, el giro total es menor de 360 grados. Además, la magnitud de la desviación respecto de los 360 grados depende de la longitud del circuito o, más precisamente, del área por él encerrada. Los lectores familiarizados con las geometrías no euclídeas creadas a lo largo del siglo pasado descubrirán lo que aquí sucede: la desviación, o exceso angular, es una medida de la curvatura de la superficie. En el caso que nos ocupa, es importante que la medida pueda realizarse gracias tan sólo a información de carácter intrínseco y local. La curvatura que más ansiosos estamos de medir, la del espacio-tiempo del universo, tendrá evidentemente que determinarse a partir de observaciones efectuadas desde el seno del propio universo. Abelson y diSessa exploran este proceso en el capítulo que cierra su libro, donde dan una formulación "tortugométrica" de la teoría general de la relatividad.

Estudian también estos autores los zigzagueos de la tortuga sobre la superficie de un cubo, cuya topología es idéntica a la de la esfera, pero cuya geometría es muy diferente. No deja de ser una geometría bien curiosa. Supongamos que el cubo tenga una arista de 100 unidades, y que la tortuga se encuentre inicialmente en el centro de una cara, orientada paralelamente a una arista. Repitamos por tres veces las instrucciones ADELANTE 100, DERECHA 90. El resultado es una figura cerrada con tres lados iguales y tres ángulos iguales. Es también un polígono, de lados iguales, cuyos vértices son todos ángulos rectos. ¿Se tratará de un triángulo rectángulo equilátero, o de un cuadrado trilátero?

Otro notable objeto de la geometría del cubo es el monógono, polígono de un solo lado. Se trata de un camino cerrado, que es trazado al avanzar la tortuga sin giro alguno. Es fácil imaginar cómo formar un monógono simple, aun cuando se carezca de tortuga guiada por ordenador: basta dibujar uno de los "ecuadores" del cubo. He aquí una cuestión más difícil: ¿Existe alguna combinación de posición y orientación inicial sobre la superficie del cubo que no llegue a cerrarse y formar un monógono al prolongar la línea indefinidamente? ¿Qué decir si la orientación ha de venir dada por números racionales? Puede verse la solución en *Turtle Geometry* (capítulo 6), pero Abelson y diSessa tratarían vigorosamente de disuadirnos de mirar allí. En cierto punto han plantado el siguiente cartel: "PELIGRO. La sección siguiente contiene



4. La tortuga escapa de un laberinto sencillo gracias al algoritmo de Pledge

matemática 'prefabricada', ya descubierta. Puede tener efectos nocivos sobre su imaginación. Utilícese sólo como último recurso".

Descubrir principios, explorar sus ramificaciones, buscar generalizaciones: estos son los rasgos característicos de la geometría de la tortuga. El proceso se simplifica enormemente con el empleo de un ordenador. Los experimentos son fáciles; el tanteo de variaciones se realiza con poco esfuerzo. Es la geometría del chapucero.

Fijémonos en el siguiente procedimiento, escrito en Logo, que Abelson y diSessa, al igual que otros autores, analizan al tratar de este lenguaje:

```
PARA CUADRASPIRAL: DISTANCIA
ADELANTE: DISTANCIA
DERECHA 90
CUADRASPIRAL: DISTANCIA+5
FIN
```

CUADRASPIRAL es el nombre del procedimiento, y DISTANCIA es una variable cuyo valor inicial hay que dar al tiempo de ejecutar el procedimiento. (Los dos puntos se usan en Logo, como signo convencional, para identificación de variables.) La tortuga recibe así la instrucción de avanzar esta cantidad, y ejecutar después un giro de 90 grados hacia la derecha; a continuación se vuelve a invocar el procedimiento CUADRASPIRAL, pero con un valor de distancia 5 unidades mayor. El resultado es una "espiral cuadrada", que va expandiéndose hacia el borde de la pantalla. (En la forma en que aquí está dada, la espiral prosigue indefinidamente su crecimiento, si bien tan sólo puede presentarse una parte finita de ella.)

Son posibles muchas variantes. Al modificar el valor de la constante que hay que sumar a DISTANCIA en cada ejecución del procedimiento sólo se altera la separación entre los sucesivos brazos de la espiral. Si, en lugar de sumarle una constante, multiplicásemos la distancia por un número fijo de veces, se crearía una espiral cuyos brazos se irían separando proporcionalmente más cuanto más alejados estuvieran del centro. Al insertar en la instrucción DERECHA 90 un ángulo constante distinto podemos convertir la espiral cuadrada en otra pentagonal o hexagonal. Un ángulo que difiera tan sólo un poco de 90 grados da pie a una serie de "cuadrados" encajados, que

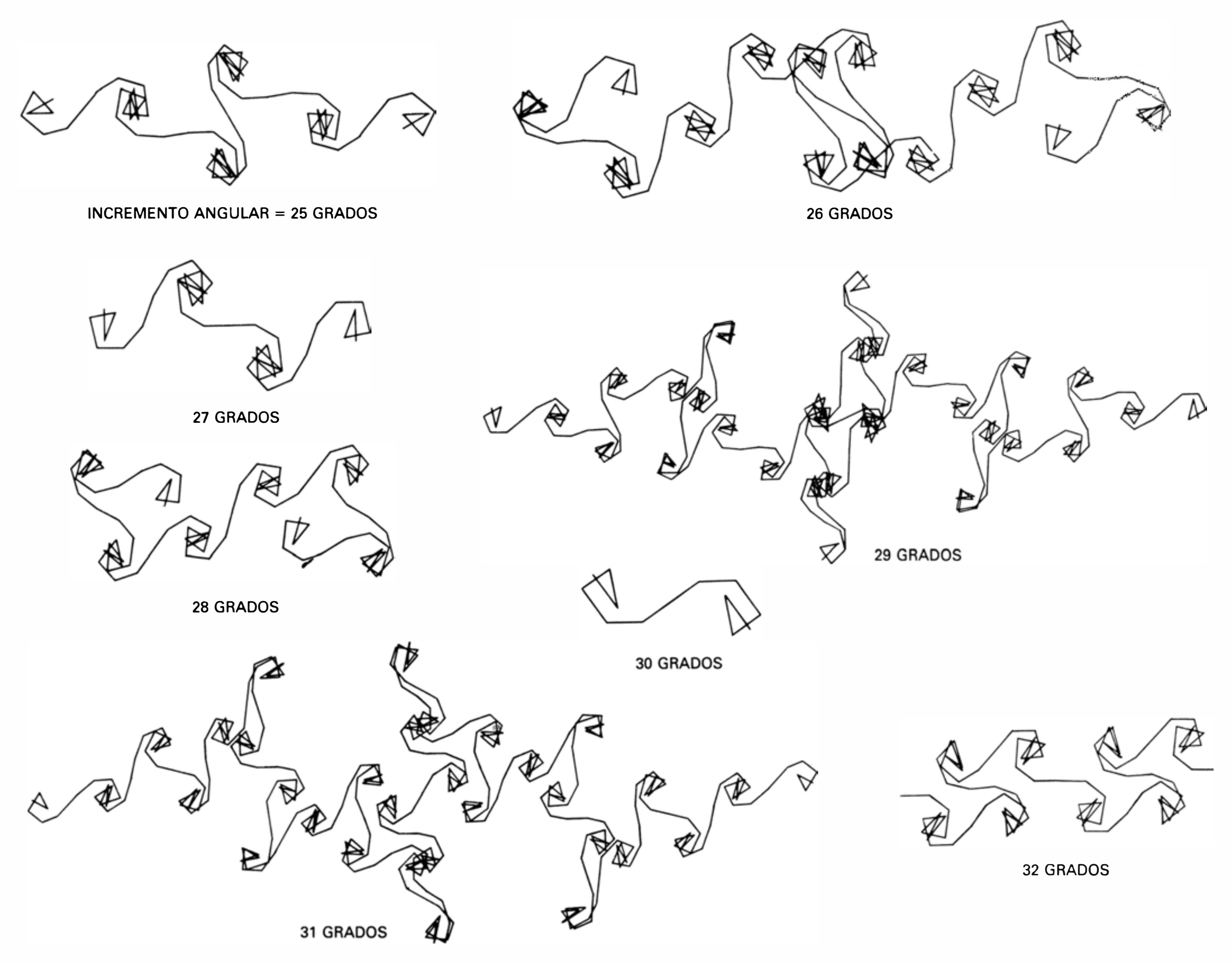
van retorciéndose y precesionando en torno a su centro, al tiempo que sus vértices definen espirales secundarias. Angulos muy pequeños prohijan buenas aproximaciones a espirales "circulares" lisas.

Puede redactarse nuevamente el programa, y hacer que en cada invocación el procedimiento, en vez de la distancia, cambie el ángulo. La transformación que se produce es notable: en lugar de una única espiral en continua expansión, la tortuga va describiendo una espiral que se repliega hacia adentro, seguida de otra espiral expansiva, de orientación contraria, otra contractiva, y así sucesivamente, generándose una configuración simétrica de espirales intercaladas y entrelazadas por sus bucles más externos. La razón subyacente es que, mientras la distancia puede incrementarse monótonamente, las magnitudes angulares se interpretan módulo 360, con lo que al sumar reiteradamente una constante el ángulo efectivo acaba por tomar valores pequeños.

Fijémonos en la subclase de curvas que se forman cuando el ángulo inicial es cero (*véase la figura 5*). Todas las figuras de esa clase son de formas fundamentalmente semejantes. La tortuga va creando cierto número de espirales de orientaciones alternantes, después gira, repasa lo andado y, tras atravesar el punto de partida, crea otra configuración simétrica respecto a él, resultado de girar 180 grados la ya dibujada. A partir de ese momento la tortuga continúa repasando indefinidamente el mismo camino. El número de espirales que componen el motivo depende sólo del valor del incremento angular; pero la naturaleza de la relación no salta a la vista. Cuando el incremento angular no es divisible por 8, el número de espirales es una unidad mayor que el máximo divisor del incremento que no sea al mismo tiempo divisor de 360. ¿Comprende el lector por qué? ¿Podrá precisar el motivo definido por incrementos divisibles por 8?

Es el ordenador quien posibilita este tipo de análisis empírico de la familia de curvas espirales. Pueden emprenderse proyectos análogos para explorar las familias de polígonos, de teselaciones del plano, o de las figuras recursivamente definidas, como, por ejemplo, el "copo de nieve", compuesto por estructuras semejantes, reproducidas a escala progresivamente menor (*véase la figura 1*). La naturaleza constructiva y algorítmica de la geometría de la tortuga contribuye poderosamente a tal proceso. Por decirlo amablemente, sería aberrante dar una ecuación que especificase la estructura completa del "copo de nieve" cuando el algoritmo que engendra la curva puede descomponerse fácilmente en unas cuantas etapas elementales, que se ejecutan después reiteradamente.

A pesar de que la tortugogeometría y el lenguaje Logo hayan conservado desde hace mucho fuertes lazos, en modo alguno son inseparables. Abelson y diSessa hacen notar que se han instalado "tortugas" en al menos otros dos lenguajes (versiones de APL y de Smalltalk), y los programas de su propio libro no vienen redactados en Logo, sino en otro lenguaje con él emparentado, que denominan Notación



5. Ocho formaciones de espirales, creadas sumando un incremento angular fijo a un ángulo inicial de cero

de Procedimientos con la Tortuga. Ofrecen además consejos para la creación de un sistema Logo en BASIC y Pascal. Un nuevo lenguaje, llamado Boxer, que actualmente están poniendo a punto miembros del grupo Logo del MIT, incorpora también una tortuga.

El Logo constituye por sí mismo un potente lenguaje de programación, apto para uso general, íntimamente emparentado con Lisp, el lenguaje que, para procesado de listas, fue ideado hace más de 20 años por John McCarthy. Hasta el punto que las principales diferencias entre Logo y Lisp conciernen a cuestiones de vocabulario y puntuación. Habiéndose originado el Logo con la intención de hacerlo accesible a niños, tiene en ciertos aspectos connotaciones antropomórficas que pueden resultar chocantes. El programador escribe como si estuviera dirigiéndose directamente a la tortuga y, en ocasiones, la tortuga le replica, enviando, por ejemplo, un mensaje de error, tal vez, "No sé cuadraspiralizar". No deberíamos dejarnos confundir por las apariencias, y pensar que el lenguaje Logo es "de juguete". Su antropomorfismo es deliberado; forma parte de una estrategia pensada para motivar e incitar al programador (sea niño o adulto) a experimentar con la tortuga y su geometría.

La conexión más profunda entre la geometría de la tortuga y el Logo es que emanan de una misma concepción de la pedagogía, inspirada en gran parte en los trabajos de Jean Piaget, donde se atribuye máximo valor educativo a lo descubierto por el propio educando. Papert, que colaboró con Piaget durante cinco años, explicita sus ambiciones en *Mindstorms: Children, Computers and Powerful Ideas*. "Programar la Tortuga comienza por hacernos reflexionar acerca de cómo haría uno mismo lo que deseamos que haga la Tortuga. Así pues, enseñar a la Tortuga a actuar o 'pensar' puede llevarnos a reflexionar sobre nuestras propias acciones o pensamientos... Es una experiencia que puede subirse a la cabeza: al pensar acerca del pensar, el niño se convierte en epistemólogo, y esa es experiencia que muchos adultos no han vivido."

Mi artículo de enero sobre aleatorización de textos literarios suscitó numerosos comentarios que he preferido no repetir aquí, en beneficio de quienes se encuentren embarcados en proyectos semejantes. Uno de los algoritmos que describí requería buscar a través de todo un texto una determinada secuencia de caracteres, y construir después una tabla de frecuencias para las letras consecutivamente situadas tras ella. Cada nueva letra añadida al texto aleatorio exigía repetir de cabo a rabo el procedimiento. Varios lectores propusieron métodos más eficientes.

Uno de los métodos propuestos, sugerido por Judith E. Dayhoff y Stephen C. Locke, consiste en valerse de la estructura de datos llamada "tabla de desmenuzamiento". Cada secuencia de letras del texto puede servir para codificar un valor numérico, que actúa como indicador de entrada a una tabla, la cual nos da la frecuencia de los caracteres que acompañan a la secuencia indicatriz. Tan sólo es preciso inscribir en la tabla aquellas secuencias que realmente aparezcan en el texto. El procedimiento debería ser muy rápido, porque la tabla de desmenuzamiento tan sólo se construye una vez; las sucesivas referencias a ella exigen únicamente calcular el índice, y no la consulta de todas las entradas a la tabla.

Bobby Bryant, James W. Butler, Ronald E. Diel, William P. Dunlap y Jim Schirmer me hicieron todos saber de otro algoritmo que no sólo es más rápido que el mío, sino mucho más sencillo. Se suprime por completo la tabla de frecuencias. Cada vez que hace falta seleccionar la letra que ha de seguir a una determinada serie de caracteres se elige aleatoriamente una porción de texto, donde habrá de comenzar la búsqueda. Pero en vez de tabular todos los casos en que se presenta la serie en cuestión, la búsqueda termina tan pronto se produce su primera aparición; el carácter consecutivo en ese caso será el seleccionado. Si la distribución de series de letras es a lo largo del texto razonablemente uniforme, los resultados deberían aproximarse bastante a los deducidos de una tabla de frecuencias.

Un importante precedente histórico de este tipo de trabajos me fue dado a conocer por Sergei P. Kapitza, redactor jefe de *V Mire Nauki*, la edición hermana de Investigación y Ciencia que se publica en la Unión Soviética. El procedimiento para seleccionar cada letra en el programa de texto aleatorio se conoce en teoría de probabilidad por proceso de Markov, en honor del matemático ruso Andrei A. Markov. Kapitza hace notar que en el primero de sus análisis de tales procesos, Markov recurrió a la aleatorización de un texto. El artículo de Markov, "Sobre la sucesión de letras en Eugenio Oneguin", pregunta precisamente hasta qué punto ese poema de Pushkin seguirá siendo de Pushkin si se entremezclan sus letras.

Taller y laboratorio

Zumbidos que detienen un objeto en rotación y formación de arcos azules en torno a una luz

Jearl Walker

Sugiero al lector que la próxima vez que se halle ante unas hélices en movimiento, un ventilador en marcha, o cualquier objeto que dé vueltas con gran rapidez, se ponga a zumbar con la boca. Variando el tono de su zumbido hasta alcanzar cierta frecuencia, conseguirá que la rotación (tal como él la perciba) parezca aminorar, cesar o desarrollarse lentamente en sentido contrario. Otra ilusión óptica que cualquiera puede comprobar por sí mismo es la aparición de arcos azules al mirar, en determinadas condiciones, una pequeña luz. La explicación del fenómeno relativo al zumbido ya es conocida, pero la ilusión de los arcos azules permanece en el misterio.

Para toda frecuencia no superior a unos 40 hertz (ciclos por segundo) acostumbra a ser posible apreciar cualquier fluctuación uniforme. Para frecuencias mayores las fluctuaciones se fusionan. Imagínese un dibujo de sectores circulares blancos y negros pegado a un plato giradiscos que funcione a 33⅓ vueltas por minuto. Si esta figura se mueve en nuestro campo visual con lentitud suficiente, porque el giro sea suave o porque los sectores sean anchos, éstos permanecen visibles. Pero a velocidades mayores, los sectores se fusionan en un gris uniforme.

En 1967, W. A. H. Rushton, de la Universidad de Cambridge, informó de que un observador puede, por procedimientos estroboscópicos, "paralizar" la rotación de un dibujo de ese tipo, aun cuando el movimiento sea tan rápido que los sectores no se distingan. Para ello, al observador le basta con ponerse a zumbar a la frecuencia conveniente. Si lo hace a una frecuencia algo menor, los sectores girarán lentamente en el sentido de la verdadera rotación. Para una frecuencia un poco mayor, el giro cambia de sentido. A este descubrimiento llegó también, en 1974, Marlin S. Werner, de Speech and Hearing Center, Oakland, California. Las causas del efecto estroboscópico las investigaron, en 1979, H. A. Mastebroek y J. B. van der Kooi, del Laboratorio de Física General de Groningen.

La figura empleada por Rushton se encuentra en los discos que muchas veces acompañan a los equipos de audio caseros para ajustar la velocidad del giradiscos. Tal ajuste se hace iluminando el disco con una lámpara doméstica alimentada por corriente alterna. En Estados Unidos, dicha corriente cambia de sentido a una frecuencia de 60 hertz, obligando a que la intensidad de la lámpara fluctúe a razón de 120 hertz. Los sectores blancos y negros del disco están de tal suerte espaciados que, cuando el giradiscos rota a la velocidad correcta, las fluctuaciones de la luz de la lámpara paralizan estroboscópicamente el movimiento del mismo.

Supongamos que, cuando la lámpara dé su máxima luminosidad, en nuestro campo visual haya un sector blanco que ocupe una posición determinada. La lámpara se apagará y encenderá, aunque a un ritmo imperceptible por nosotros. Para entonces, el movimiento del disco habrá llevado otro sector blanco a la misma posición. Esta igualación de la rotación del disco y de la fluctuación de la iluminación de la lámpara crea la ilusión de que cada sector blanco permanece en su sitio.

Si el giradiscos rota un poco más rápido, la figura se moverá lentamente en el sentido de la rotación verdadera. Efectivamente, en uno de los destellos encontraremos que los sectores blancos tienen una orientación determinada; pero, en el destello siguiente, el giradiscos los habrá hecho avanzar; a cada destello, se mostrará un avance igual. Nos engañaremos interpretando el movimiento como una rotación lenta en el sentido del giro del plato. Mas si éste gira con mayor lentitud, las sucesivas iluminaciones del dibujo generarán la ilusión de que lo hace en el sentido inverso. En ambos casos, la rapidez del desplazamiento indica en qué cuantía está desajustada la velocidad del plato.

Rushton experimentó con un disco estroboscópico destinado a comprobar platos giradiscos ingleses a 33⅓ rpm. En Gran Bretaña, y en toda Europa, la frecuencia de la corriente alterna es de 50 hertz, lo que hace que la luminosidad de la lámpara fluctúe a razón de 100 hertz; a ello corresponde un tiempo de 0,01 segundos entre iluminaciones. Los sectores del disco estaban dibujados con un espaciado tal que la rotación de un sector blanco hasta el sitio previsto en el campo visual de un observador durase 0,01 segundos. Al observar Rushton el disco sobre un plato que giraba a la velocidad correcta aquél parecía inmovilizarse.

Como cabe presumir, el efecto estroboscópico desaparece con una iluminación estacionaria, la solar por ejemplo. Rushton descubrió, empero, que incluso con luz estacionaria lograba paralizar el dibujo zumbando con una frecuencia de unos 100 hertz. Si el tono de su zumbido era levemente inferior, el dibujo se movía lentamente en el sentido de la rotación auténtica. Si lo era levemente superior, se movía lentamente en sentido contrario. Las demás fuentes sonoras de la habitación no ejercían efecto alguno.

¿De qué manera originan el efecto estroboscópico las vibraciones del zumbido? ¿Sacuden quizás el nervio óptico de tal modo que la transmisión de señales al cerebro se vea periódicamente disminuida o retrasada? Para verificarlo Rushton ideó un experimento. Pretendía forzar un retraso en la transmisión de una imagen al cerebro.

Echó mano de un filtro oscuro. Sabido es que cuando la luz cae en la retina, esta información es remitida inmediatamente al cerebro. Si la luz palidece después, la información se retrasa varios milisegundos. Rushton razonaba así: si las vibraciones de su propio zumbido agitaban las fibras nerviosas, u otra cosa, en el trayecto que une la retina con el cerebro, al amortiguar su visión del dibujo en rotación haría que una figura estroboscópica estacionaria se desplazase en virtud del retraso impuesto. No observó desplazamiento alguno, comprobando así que el zumbido no afectaba al trayecto que partía de la retina. Antes bien, era evidente que actuaba sobre ambos ojos y eran los huesos faciales los que conducían hasta éstos las vibraciones procedentes de la boca y garganta.

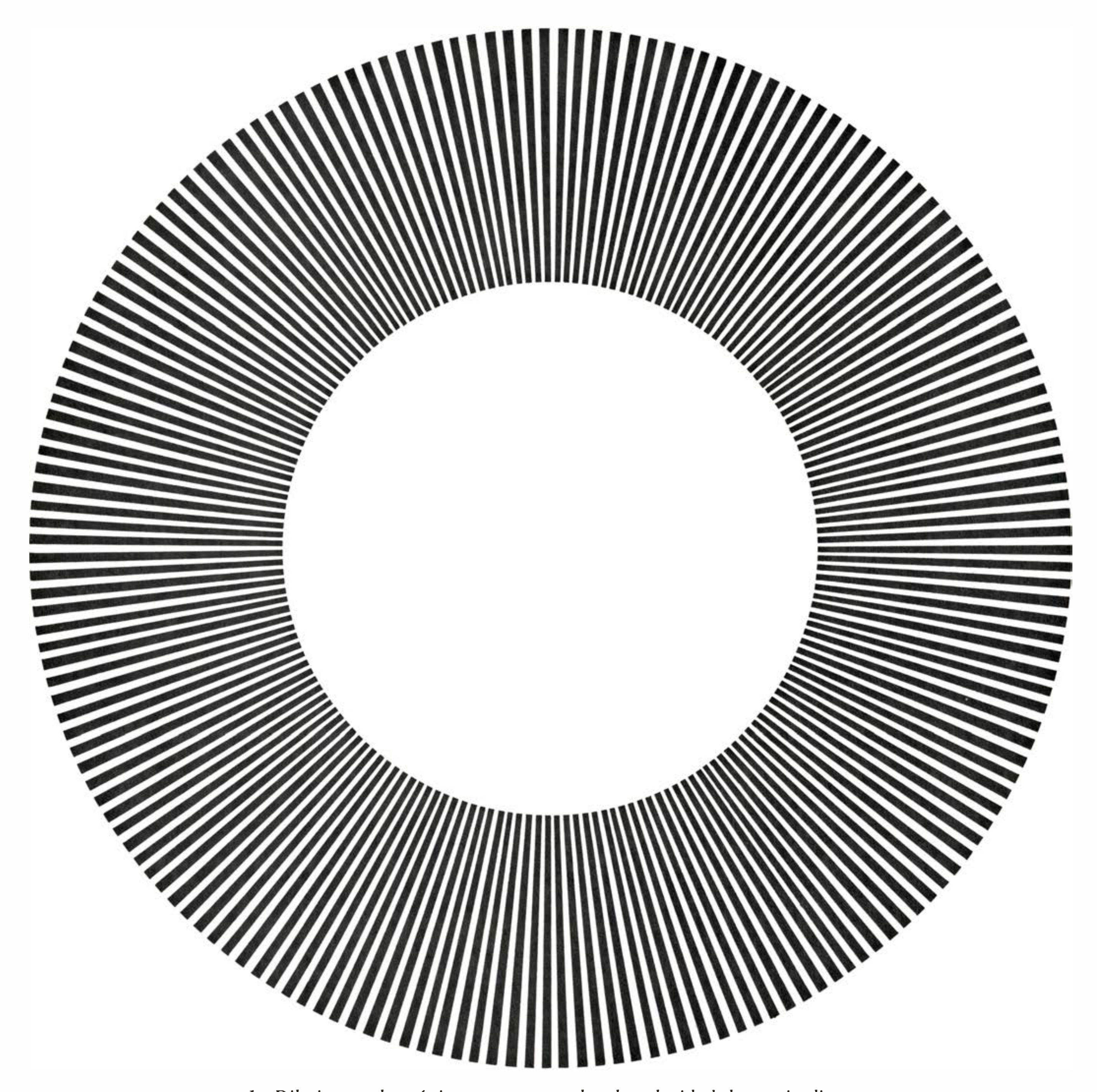
De esta explicación de Rushton se han ocupado Mastebroek y van der Kooi. A propósito del segundo, véase la figura 2. La figura blanca y negra colocada en el plato de un giradiscos barre el campo visual del observador. En la ilustración, el movimiento se representa con respecto a un eje fijo en la habitación. En el apartado *a*, el ojo, al que la vibración hace oscilar verticalmente, se encuentra en su posición más alta. La frecuencia a la que se relevan los sectores blancos en el campo visual

es igual a la del zumbido y, por tanto, a la de vibración del ojo.

En este apartado *a* de la ilustración hay un sector blanco que yace en el eje óptico, que va desde el centro del campo visual hasta la retina. Ese sector blanco constituye la imagen central en la retina. En los apartados *b* y *c* el dibujo del disco y el ojo se mueven hacia abajo, manteniéndose la imagen del sector blanco en el centro de la retina. Pero, en los apartados *d, e* y *f*, el dibujo prosigue hacia abajo, mientras que la vibración mueve el ojo hacia arriba. Entonces, el sector blanco, que estaba antes en el centro de la retina, se traslada hacia arriba. A la vez, en el centro de la retina se formará por un instante la imagen de un sector negro. El ciclo se inicia de nuevo en el apartado *f*.

Durante la mayoría del tiempo que dura una sola vibración del ojo, en el centro de la retina se recibe la imagen de un sector blanco. Otros puntos de la retina, repartidos regularmente, serán asimismo iluminados por sectores blancos durante casi todo el tiempo. En todos esos puntos ni las imágenes blancas ni las negras se perciben por separado, tal es la rapidez de la vibración, sino que el sistema visual promedia las intensidades luminosas a lo largo de cada vibración completa, atribuyendo a los puntos con imágenes blancas un valor medio de la intensidad que los hace luminosos. Por otro lado, los puntos de la retina que reciben imágenes negras durante la mayor parte del tiempo dan un promedio más oscuro. Y si el observador zumba a la frecuencia correcta, esa distribución de promedios se refuerza con cada oscilación del ojo. Así, aunque la imagen recibida esté menos definida que la que dé el disco (cuando está parado), será observable.

Es posible observar un buen número de efectos estroboscópicos inducidos por zumbido. Werner describe cómo valerse de ello para hacer inestable la imagen de un televisor: se sitúa a unos 30 metros del aparato y se pone a zumbar a través de los dientes a una frecuencia de 60 hertz. Con anterioridad, Philip C. Williams y Theodore P. Wil-

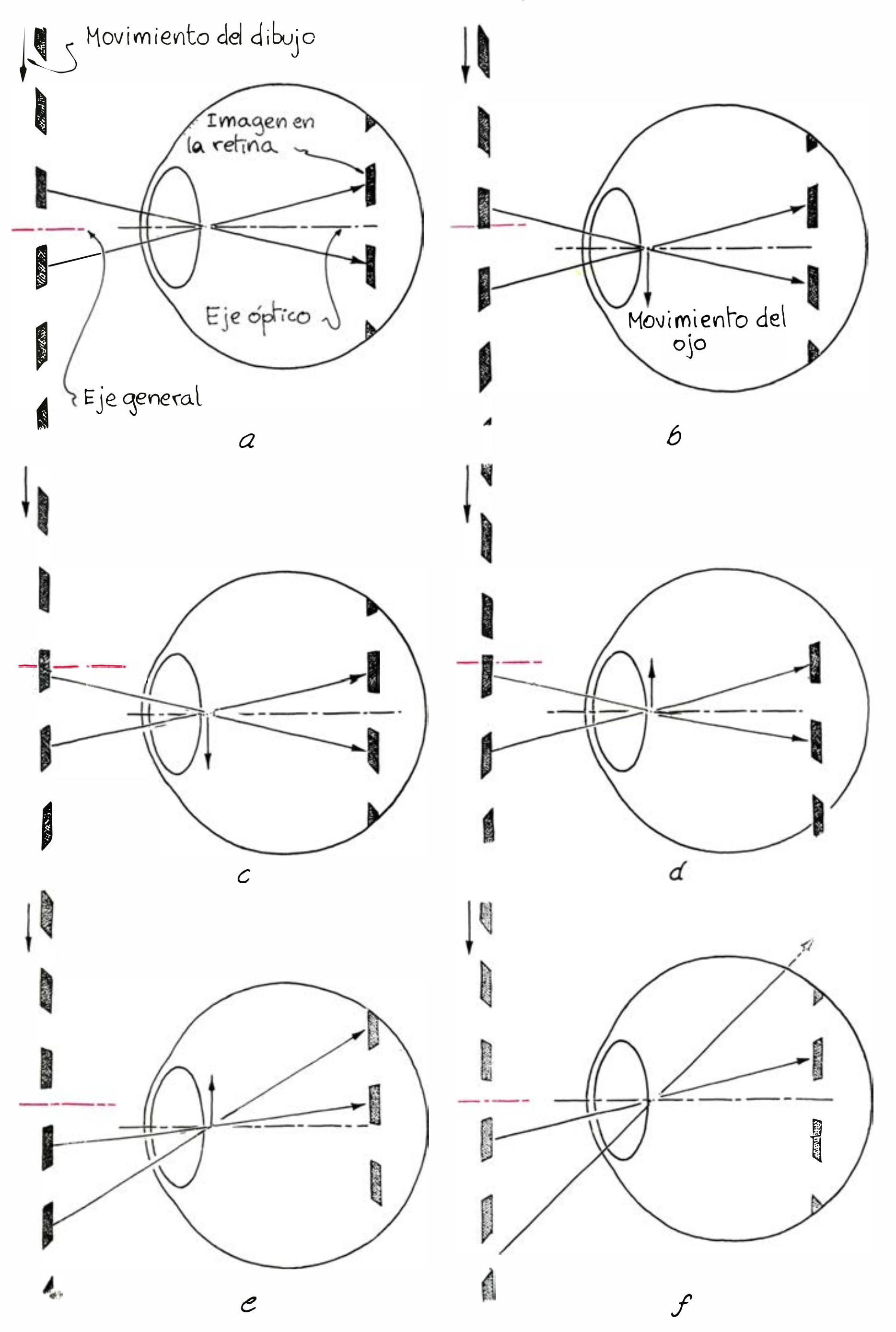


1. Dibujo estroboscópico para comprobar la velocidad de un giradiscos

liams, de Tallahassee, Florida, ya habían informado de qué modo un zumbido podía alterar una imagen de televisión. En sus observaciones, el zumbido creaba en la pantalla unas rayas negras horizontales ilusorias. Ajustando la frecuencia del zumbido, la persona emisora puede inmovilizar una raya, o bien hacerla subir o bajar. Determinadas frecuencias más altas (evidentemente armónicos de la más baja) dan rayas múltiples.

Werner describe asimismo cómo paraliza estroboscópicamente mediante un zumbido los radios de los cubos de las ruedas en rotación de los automóviles y los tornillos de fijación de las ruedas de camiones en movimiento. Ocurre, además, que una persona que conduzca un automóvil a lo largo de una valla de estacas puede inmovilizar éstas zumbando con la boca.

La exposición más curiosa acerca de un efecto estroboscópico la publicó J. L. Scott-Scott, de Nuneaton (Inglaterra), el cual dio con un método para determinar el sentido de giro de las hélices de avión. Para ello ponía a vibrar su cabeza haciendo que su lengua batiera, sin violencia, contra el cielo de la boca a la vez que exhalaba. Comenzaba con una frecuencia de vibración alta, para bajarla poco a poco hasta paralizar estroboscópicamente las hélices. Luego, amortiguaba la frecuencia un poco más, y el lento movimiento de la imagen estroboscópica de las hélices revelaba el sentido real de su rotación.



2. *Así "inmovilizan" un dibujo los movimientos del ojo causados por el zumbido*

Sujetando con cinta adhesiva una hoja de papel extendida en una de las caras de un disco de larga duración, construí un disco estroboscópico. En el centro del papel puse un punto de referencia coincidente con el orificio del disco. Seguidamente tracé sectores radiales con una abertura de un grado. (Las medidas deben hacerse todas antes de colocar el disco en el plato, pues la espiga de éste atraviesa el papel y destruye el punto de referencia.) Los sectores los pinté con tinta negra uno sí y otro no.

Cuando este disco gira a 33⅓ rpm, el giradisco funciona a una frecuencia de 0,555 hertz. Porque dividí el disco en 180 parejas de sectores blancos y negros, la frecuencia a que se repetía cada posición valía 0,555 hertz por 180 parejas, o sea, unos 100 hertz.

La confección del disco, tediosa, no salió cuan buena hubiera querido debido a las variaciones en la oscuridad de los sectores negros. Estas variaciones me distraían fácilmente cuando ponía el disco a girar a 33⅓ rpm. Había, además, otros detalles de la rotación que me hacían seguir el movimiento del disco, impidiéndome concentrar la mirada en una sola zona. No obstante, la paciencia me enseñó a ignorar la mayoría de los elementos de distracción y a concentrarme en el borrón acromático.

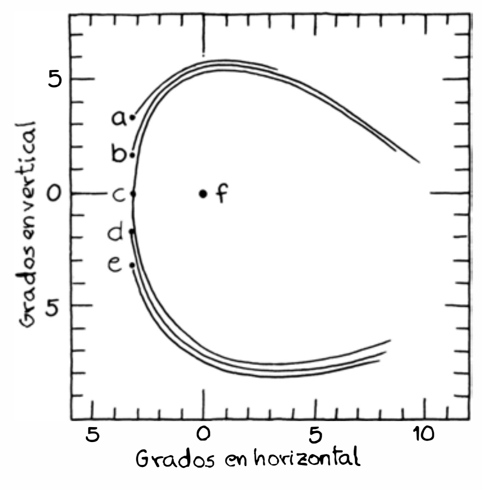
Al iluminar el dibujo en rotación con una lámpara doméstica de corriente alterna, sólo veía el borrón. La luz parpadeaba a razón de 120 hertz, frecuencia superior a los 100 hertz necesarios para inmovilizar el dibujo. Con el giradiscos bajo luz solar traté de zumbar a unos 100 hertz, que me asegurarían la inmovilización del dibujo. Mas, aunque mi zumbido variaba entre los límites de frecuencia adecuados, no lo conseguí.

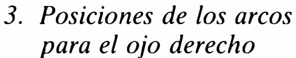
Recurrí entonces a un procedimiento más sencillo de poner a vibrar mi cabeza. Conecté un altavoz a un audioamplificador excitado por un generador de señales. Ajustando alta la salida del amplificador, introduje la barbilla en el cono del altavoz. Así, mi cabeza se puso a vibrar. Actuando con una mano, hice que el oscilador recorriera poco a poco una zona de frecuencias centrada en los 100 hertz, a la vez que mantenía fija la vista en una sección del dibujo en rotación. Elegí la sección que caía a mi derecha. Dentro de mi campo visual, el dibujo se movía hacia abajo.

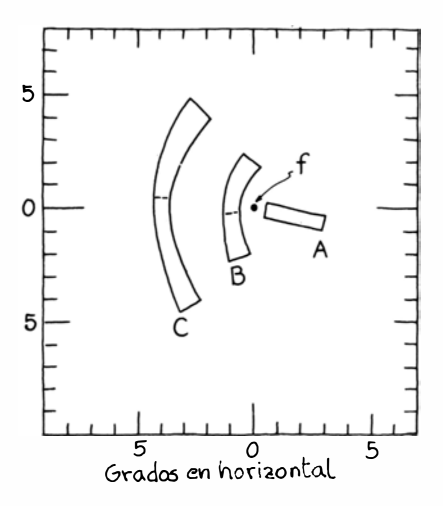
A una frecuencia de unos 100 hertz, se percibía una figura estroboscópica apagada sobre el fondo acromático. Al elevar o remitir ligeramente la frecuencia, la figura se desplazaba del modo

descrito por otros. Ni siquiera tenía que mirar el mando de frecuencia para inmovilizarla, una y otra vez, a la misma frecuencia. En cuanto sacaba la barbilla del altavoz, o llevaba la frecuencia a valores muy distintos de los 100 hertz, la figura estroboscópica desaparecía.

Podría ser interesante para el lector confeccionar su propio dibujo estroboscópico y proseguir con estas experiencias. Podría, además, experimentar con otros objetos vibrantes o rotatorios. ¿Se ve capaz de inmovilizarlos zumbando adecuadamente?




3. *Posiciones de los arcos para el ojo derecho*



4. *Posiciones del estímulo, según J. D. Moreland*

A principios del siglo XIX, Johannes Purkinje, iniciador de la óptica fisiológica, descubrió que la luz emitida por un trozo pequeño de yesca encendida creaba dos arcos azules de un lado a otro de su campo visual. Aunque estos arcos no tardaban en desvanecerse, podía controlar su luminosidad y duración moviendo la yesca arriba y abajo, barriendo con su luz diferentes partes de su retina. Si los arcos desaparecían, los regeneraba readaptando sus ojos a la oscuridad durante unos minutos.

Desde aquella época, la causa de estos arcos, y especialmente la razón de su color azul, ha constituido un misterio fisiológico. La relación entre el lugar de la retina iluminado y la forma del arco generado ha sido estudiada por numerosos investigadores. Artículos recientes de J. D. Moreland, antiguo miembro del Instituto Oftalmológico de Londres, me han facilitado instrucciones detalladas acerca de cómo repetir estas observaciones.

Moreland sugiere el procedimiento siguiente para observar los arcos de Purkinje. Déjese que un ojo se adapte a la oscuridad durante un minuto al menos, pero no más de tres. Enciéndase una luz pequeña. (La mejor será una amarilla o roja de longitud de onda comprendida entre los 510 y los 620 nanómetros.) Según sea la ubicación de la luz en nuestro campo visual, veremos uno o varios arcos durante un segundo aproximadamente. Para repetir las demostraciones, hay que encender la luz de la habitación dos o tres minutos cada cinco minutos. A lo largo del período de oscuridad se encenderá luz amarilla o roja durante medio segundo, repitiendo el estímulo cada cuatro segundos.

Para ver arcos brillantes y completos importan tanto la orientación como el tamaño del estímulo lumínico. Un manantial rectangular pequeño da buenos resultados, ya que puede situarse de forma que excite varios arcos solapados cuyas luminosidades puede sumarlas el sistema visual. Si se coloca una fuente rectangular en la parte del campo visual próxima a la nariz, su lado mayor debe ponerse vertical; si se coloca en la parte próxima a la sien, su lado mayor se pondrá horizontal.

Esta preferencia en la orientación está relacionada con la extensión de retina que se ilumina y con el lugar del campo visual donde aparecen los arcos. Cada una de las pequeñas secciones de las que se compone una fuente rectangular crea un arco de forma específica; entonces, para que el arco resultante sea brillante y completo, la dispersión del conjunto de arcos será pequeña.

En la figura 3 se muestran algunos de los arcos posibles, susceptibles de ser percibidos con el ojo derecho, y un manantial constituido por una rendija vertical. Se supone que la anchura de ésta es despreciable y su altura abarca 15 minutos de grado en el campo visual del observador. El punto *f* es el punto de fijación, es decir, el punto del campo visual al que se dirige la vista. (La imagen de este punto cae en la fóvea, que es la zona más sensible de la retina.) La gráfica del campo visual está medida en radianes, con el punto de fijación en el origen.

Si la rendija está en *c*, se excita el arco grande que pasa por *c*. (En la ilustración aparece sólo el centro del arco; en realidad, la anchura de éste es de un grado.) Cuando la luz se traslada al punto *b*, en la parte superior del campo visual se excita otro arco. Cuando se lleva al punto *d*, aparece otro arco en la parte inferior del campo visual.

Una ranura de longitud superior a 15 minutos puede excitar gran número de arcos. Entonces, lo que ve el observador es una composición de ellos. La visibilidad de ésta depende en parte del modo en que se solapen tales arcos. Supongamos que la rendija abarque el campo visual de *b* a *c*. El arco resultante será luminoso porque la extensión de los arcos componentes es suficientemente pequeña para que el sistema visual pueda sumar sus intensidades. Análogamente, si la rendija es lo bastante larga para llenar la distancia de *c* a *d*, se creará otro arco compuesto.

Con rendijas aún mayores decrece la visibilidad del arco compuesto. Por ejemplo, si la misma se extiende de *a* a *c*, el solapamiento de los arcos produce un arco resultante excesivamente ancho para que la suma de las luminosidades sea completa. Y, así, este arco será más ancho que el generado por una ranura más corta, pero no será proporcionalmente más luminoso. Si la ranura se orienta horizontalmente en *c*, la percepción resulta más deficiente incluso. Con esta orientación se excitan un mayor número de arcos para dar un arco compuesto ancho.

En la figura 4 se muestran tres regiones arbitrarias del campo visual del ojo derecho, en las que Moreland considera la posibilidad de emplazar manantiales luminosos. Si uno de éstos se coloca, pongamos por caso, en *C* y posee la forma curva con que se representa se generarán arcos de buena calidad. Un estímulo lumínico, curvo, situado en la zona *B* genera unos arcos de posición y curvatura diferentes. El estímulo de la zona *A* es distinto. Si entre el punto de fijación y el punto ciego (punto por el que las fibras del nervio retiniano salen hacia el cerebro) se coloca un manantial estrecho aparece una púa azul.

Veamos cómo Moreland pone de manifiesto los distintos arcos. Colóquese en la zona *A* una fuente luminosa rectangular, de unos 0,66 grados de ancho por unos 2,5 grados de largo. En el apartado *b* de la figura 5 se representa la posible aparición de la púa azul. Rotando la cabeza alinearemos la púa con el estímulo, como se indica en el

apartado *a*. Y si, simultáneamente, se ofrece el mismo posicionamiento al ojo izquierdo, se conseguirá una llamativa visión de dos púas azules.

A continuación, colóquese en la sección *B* una fuente luminosa. Para que los resultados sean buenos, ésta debe tener unos 4,5 grados de largo por unos 0,66 grados de ancho en la parte más estrecha. Sus extremos son acampanados. La fuente genera dos arcos simétricos si ella misma guarda simetría con respecto a la recta que une los puntos de fijación y ciego (apartado *c*). Ladeando la cabeza puede completarse o romperse la simetría de los arcos.

Para poner de manifiesto la fuerte dependencia que muestran el tamaño y posición de los arcos con respecto a la posición de la fuente, se disponen dos fuentes, como se muestra en el apartado *d*. Una de ellas ocupa la mitad superior de *C*, y la otra, la mitad inferior de *B*. Los arcos resultantes aparecen disociados y poseen curvaturas sensiblemente distintas. Con luces estímulo que ocupen las tres posiciones, el resultado lo formarán dos arcos en herradura y una púa (apartado *e*).

En todas estas demostraciones los arcos aparecen tan pronto se enciende el estímulo lumínico. Cuando se apaga la luz, en las condiciones convenientes, se distinguen unos arcos similares, aunque más débiles. Los tiempos de encendido y apagado de las luces de la habitación son los mismos, pero en este caso, durante el período de oscuridad, la luz está encendida 3,5 segundos y apagada 0,5 segundos. Quizá haya que insistir en esta secuencia antes de que surjan los arcos "de apagado".

Moreland sugiere una fuente de luz inactínica con una lámpara de 60 watt cubierta de un filtro rojo o amarillo. Por mi parte, he descubierto que, para generar arcos, sirven casi todas las luces pequeñas (una simple linterna) provistas de un filtro rojo o amarillo.

Para construir una fuente luminosa del tipo sugerido por Moreland, se sujeta a una lámpara una hoja de cartón duro, recortada convenientemente. Luego se ajusta la distancia que debe mediar de la lámpara, hasta que el tamaño angular de la hendidura recortada sea el correcto dentro del campo visual. Puede emplearse una lámpara plana de las que se usan para contemplar y clasificar diapositivas.

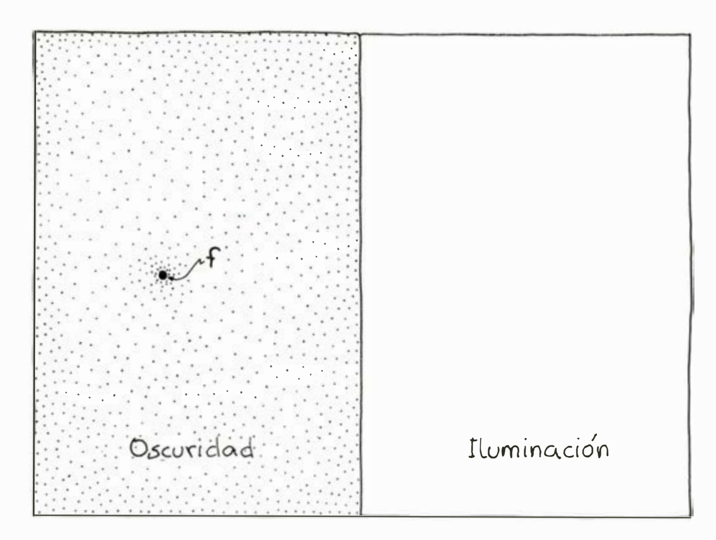
Efectué la mayoría de mis observaciones en un ordenador personal, que tengo equipado de una pantalla monitora en blanco y negro. Para los primeros ensayos introduje en la memoria un programa alfabético. Como luz estímulo me valí del índice intermitente del monitor. Ese índice es blanco; por ello, fijé, con cinta adhesiva, un filtro rojo sobre la pantalla. Para crear un punto de fijación, tecleé un punto ortográfico casi en el centro del monitor. Entonces, con el índice situado a la izquierda del punto fijé la visión de mi ojo derecho concentrándome en este último. Tras determinar la mejor distancia entre el monitor y mi cabeza, mantuve ésta en posición con libros y otros objetos.

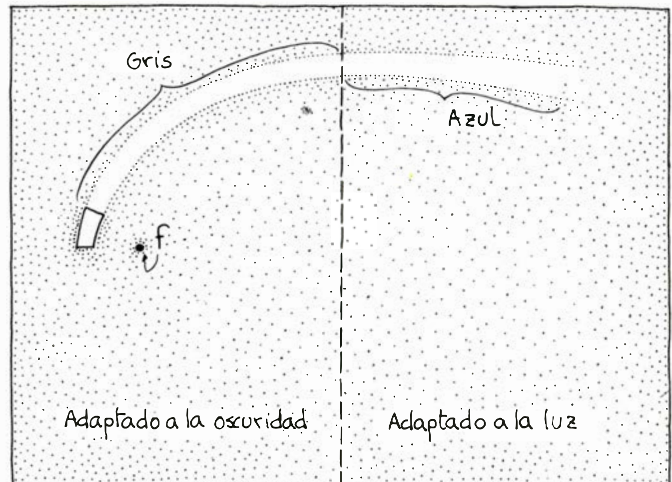
Para conseguir otras formas y orientaciones de la luz estímulo redacté un programa (en BASIC) que pudiera alumbrar distintas porciones del monitor. La figura iluminada se encendía y apagaba a la frecuencia establecida por los bucles FOR-NEXT del programa. Por ejemplo, para una sentencia de FOR K = 1 to 500: NEXT, la figura permanecía en la pantalla hasta que el ordenador hubiera contado hasta 500. Con otro bucle mantenía la pantalla a oscuras (salvo en el punto de fijación) durante el tiempo que me parecía.

Se han propuesto muchas explicaciones para los arcos azules. Purkinje y otros creían que resultaban de la dispersión de la luz dentro del ojo. Otros investigadores apuntaron hacia la bioluminiscencia, basándose en la hipótesis de que la excitación de las fibras nerviosas por la luz estímulo provocaba la emisión de radiación ultravioleta, la cual, a su vez, excitaba las células fotoreceptoras situadas en las zonas de los arcos. Ambas hipótesis han sido remplazadas por otra según la cual la excitación de las fibras nerviosas por un estímulo lumínico activa trayectos nerviosos contiguos. La interpretación personal de esa actividad es la percepción de arcos azules. Estos arcos cubren unas regiones que, en realidad, no están iluminadas.

Para crear la percepción de arcos, lo primero es hacer que una luz estímulo ilumine una pequeña porción de la retina, excitando los conos. Con ello, se activan eléctricamente las fibras nerviosas conectadas a éstos. Las mismas fibras excitan también eléctricamente las fibras vecinas conectadas a los bastoncitos que se hallan en otro lugar de la retina. Así, el observador recibe señales de los conos excitados por la luz y de las fibras nerviosas conectadas a los bastoncitos, que no están iluminados. El cerebro, engañado, cree que los bastoncitos están también iluminados. Se

5. Tipos de arcos





6. Dispositivo para evidenciar los colores de los arcos

da la circunstancia de que los bastoncitos se disponen en la retina en forma de arco.

Si bien esta explicación de los arcos es prometedora, el origen de su color sigue sin localizarse. Se admite que los bastoncitos son acromáticos. Así, pues, ¿cómo podría la ilusión de que son excitados inducir a creer al observador que está contemplando un color azul? Además, los arcos sólo son azules cuando el ojo está todavía parcialmente adaptado a la luz; pero cuando éste se habitúa por completo a la oscuridad, se decoloran hasta un blanco apagado.

En 1977 Carl R. Ingling, Jr., y Bruce A. Drum, de la Universidad estatal de Ohio, presentaron una explicación de la coloración de los arcos que parece resolver el problema. Para seguir sus explicaciones hay que disponer un campo visual que esté iluminado por una parte y oscuro por la otra. Tras 10 minutos de adaptación de los ojos a la oscuridad total, se fija la mirada en el campo. (En la figura 6 se sugiere un dispositivo adecuado al ojo derecho.) Pasados algunos minutos, este campo se sustituye por otro completamente a oscuras, salvo por un pequeño punto de fijación poco luminoso y una luz roja lentamente destelleante necesaria para estimular los arcos. En la ilustración se muestra uno de los tipos de arcos que es posible ver.

La parte del arco que cae en la zona previamente adaptada a la iluminación es azul. La parte que se encuentra en la zona previamente adaptada a la oscuridad es blanco mate. Si el ojo se mantuvo inmovilizado sobre el punto de fijación, la separación entre los dos colores aparecerá nítida.

Para repetir esta experiencia con mi ordenador incluí en el programa BASIC algunas órdenes que iluminaban la mitad derecha de la pantalla tiempo suficiente para que se adaptara esa zona del campo visual de mi ojo derecho. El punto de fijación se encontraba en la parte izquierda de la pantalla. Al siguiente paso del programa la pantalla se oscureció del todo, salvo una figura lentamente destellante y el mismo punto de fijación. Como antes, había fijado un filtro rojo encima del lugar donde aparecía la figura estímulo.

Esta explicación que dan Ingling y Drum de la coloración de los arcos se basa en un modelo de la respuesta retiniana, publicado con anterioridad, que recibe el nombre de entorno mudo. En este modelo se supone que un grupo de fotorreceptores retinianos se compone de unas células centrales que reaccionan a la luz, y de unas células que la rodean, o circundantes, que, a veces, pueden modificar la rapidez a la que el centro envía las señales al cerebro. Con la expresión entorno mudo se quiere dar a entender que, cuando el centro está no excitado, la excitación del entorno no altera su rapidez de funcionamiento. Pero cuando el centro se excita más que el entorno, éste inhibe las señales de aquél hacia el cerebro.

El modelo del entorno mudo podría aplicarse a la generación de los arcos de Purkinje si el centro incluyese algunos conos, los cuales responden de la información sobre el amarillo y el azul que recibe el cerebro. El entorno se compone de bastoncitos. Estos no reaccionan al color, por lo que es imposible que ellos coloreen directamente los arcos. Pero, según la hipótesis de Ingling y Drum, los bastoncitos producen indirectamente el color azul cuando inhiben las señales amarillas procedentes de los conos amarillo-azules del centro.

En la teoría de los colores moderna se piensa que la percepción de éstos es el resultado de dos tipos de competición entre los conos. Estos se hallan especializados en su respuesta a los colores. Hay un tipo de conos que responden al rojo, otros al verde y un tercero al azul. Evidentemente, el sistema visual ordena estas tres respuestas en dos pares de colores complementarios: rojo y verde una, azul y amarillo la otra.

Los arcos de Purkinje podrían generarse como sigue. La luz estímulo ilumina una porción restringida de la retina, excitando sus conos. Poseen estos unas fibras nerviosas que discurren junto a otras procedentes de distintas partes de la retina, de modo que la excitación eléctrica del primer grupo de fibras excita al segundo grupo. Presumiblemente, parte de las fibras nerviosas del segundo grupo están unidas a los bastoncitos que se cuentan entre las células de entorno.

Cuando se excita este segundo grupo de fibras, ¿qué señal transmiten al cerebro? Primero, dan una señal ilusoria de que la retina ha sido iluminada en los lugares en los que están conectadas a los bastoncitos del entorno. Segundo, podrían, asimismo, producir una ilusión de coloración azul, según sea el estado de los centros de los que forman parte. Si el ojo está completamente adaptado a la oscuridad, los centros ni se hallan excitados ni transmiten información de color. Por tanto, la excitación de las fibras de los bastoncitos envía al cerebro una señal desprovista de color. En consecuencia, el observador ve un arco blanco mate.

Si el ojo no está completamente adaptado a la oscuridad, los conos de los centros siguen enviando información de color al cerebro. En particular, algunos de ellos están mandando una señal amarilla. La excitación de las fibras enlazadas a los bastoncitos del entorno de esos conos inhibe entonces dicha señal amarilla: el efecto es que al cerebro se transmite una señal azul.

Libros

Strawson, métodos estocásticos, Ilustración y un curso universitario de química técnica

J. J. Acero, F. J. de la Rubia y M. G. Velarde, J. L. Peset y A. Lafuente, L. Alonso y P. Molera

Ensayos Lógico-Lingüísticos, de Peter F. Strawson. Editorial Tecnos; Madrid, 1983. Strawson es un conocido filósofo inglés de nuestros días, profesor en Oxford y autor de importantes obras sobre temas filosóficos y lingüísticos. No puede decirse de estos *Ensayos* que vayan a contribuir de una forma decisiva a que el lector se haga una idea cabal de su pensamiento, pues el contenido de esta recopilación responde a temas que, en conjunto, no tienen en común sino abordar ideas tan vagas como las que delimitan los dominios de la filosofía de la lógica y de la semántica filosófica, más allá de cuyos nombres pocas cosas hay que no sean monstruos. Sin embargo, esta obra resulta un complemento útil para quien conozca otros libros de Strawson, como *Individuals, Subject and Predicate in Logic and Grammar* o su *Introducción a una teoría lógica*.

Doce son los ensayos de este volumen y abarcan en total veinte años de producción lógico-semántica: de 1950 a 1970. En ellos discute un amplio espectro de cuestiones desde una perspectiva filosófica. Puesto que, casi sin excepción, Strawson acompaña esas discusiones de exposiciones escuetas, pero muy claras, de las tesis filosóficas de que se ocupa, esta obra nos permite hacernos una idea de los objetivos perseguidos por una parte significativa de la filosofía de la segunda mitad de este siglo, así como también de algunas de las contribuciones concretas de tal o cual autor. Por estas páginas pasan las figuras de Russell, Quine, Chomsky, Grice, Davidson o Austin, aparte de ecos de otros, como Frege, Ramsey o Wittgenstein. No es la significación global de estos autores lo que Strawson analiza, sino estas o aquellas doctrinas suyas de especial interés.

Sin seguir el orden en que aparecen en esta obra, estos dos ensayos se clasifican así: de temas lógicos (el de la naturaleza de la llamada verdad lógica y el de la verdad, en general) tratan los ensayos VI, X, XI y XII: "Proposiciones, conceptos y verdades lógicas", "Verdad", "Un problema sobre la verdad" y "Verdad: una reconsideración de los puntos de vista de Austin"; de temas semánticos (como el de la articulación entre sintaxis y semántica en un modelo generativo de análisis gramatical, el de la fundamentación de la teoría del significado y de la pragmática lingüística) se ocupan los ensayos VII, VIII y IX: "Gramática y filosofía", "Intención y convención en los actos de habla" y "Significado y verdad"; a temas lógico-semánticos (la naturaleza de la relación referencial o relación de designación, la semántica, o pragmática, de los términos de referencia vacía y la lógica que imponen al análisis del discurso, la diversidad de funciones de sujetos y predicados) se dedican los ensayos I, III, IV y V: "Sobre el referir", "Términos singulares y predicación", "Referencia identificadora y valores de verdad" y "La asimetría de sujetos y predicados". Podría incluirse "Particular y general", el segundo de los ensayos de la recopilación, en este último apartado; pero "Particular y general" es, propiamente hablando, un ensayo de metafísica –de *metafísica descriptiva*, por emplear el término que Strawson introdujo en *Individuals*–: es decir, de análisis contrastado de conceptos con un dominio de aplicación muy general. En este caso, de conceptos como 'individuo' 'propiedad' (en un sentido diferente del usual), 'instancia', etc. Para Strawson, un análisis así constituye un requisito previo al estudio de categorías lógicas y semánticas (como se desprende de los ensayos III y IX, por ejemplo) o al de la obtención de teorías gramaticales adecuadas en lo explicativo (como se infiere del ensayo VII).

No todos los ensayos de estos *Ensayos* tienen un interés parejo. Pero sí comparten dos cosas. La primera: una forma de hacer filosofía conceptualmente muy rigurosa. La segunda: una extraordinaria técnica expositiva, que se manifiesta en el modo que tiene Strawson de organizar un material complejo, rico en ideas y de abundantes facetas. Esta diafanidad del planteamiento y de la estructura del texto constituye una valiosa ayuda allí donde, por lo abstruso de su contenido, el texto exige del lector un esfuerzo especial. Los interesados por la técnica del ensayo filosófico encontrarán en "Sobre el referir", "Referencia identificadora y valores de verdad", "Intención y convención en los actos de habla" y "Significado y verdad" modelos muy atractivos.

De los tres grupos de ensayos que he distinguido, los de temática lógica son los que poseen un atractivo menor. El ensayo VI discute la doctrina sustitucional de la verdad lógica (la doctrina de Bolzano-Quine), es decir, la doctrina según la cual son verdades lógicas las que dan lugar a nuevas verdades cuando sus términos extra-lógicos son sustituidos por términos extra-lógicos según tal o cual pauta, pauta que hay que especificar. Strawson, creo yo, ofrece argumentos adecuados al objetar la elaboración extensional que Quine ha hecho de esta doctrina.

Pero las páginas de Strawson, podría uno poner como reproche, no tienen más que un interés histórico. Tarski había visto ya en los años treinta que las verdades lógicas no son las mismas según la pauta sustitucional que según la pauta modelista y hoy en día Hinman, Kim y Stich han descubierto otras deficiencias. Así que, en parte, el esfuerzo de Strawson es baldío. Algo similar puede decirse de los ensayos dedicados al examen de la concepción austiniana de la teoría de la correspondencia de la verdad. Strawson resulta muy convincente en cuanto a las debilidades de la propuesta de Austin-Warnock, pero, salvo en cuestiones de detalle, no encuentra uno una alternativa propia bien definida y articulada. Es más: queda incluso la sombra de la ambigüedad sin despejar, pues Strawson abre "Verdad" diciendo que la teoría de la verdad como correspondencia "requiere, no purificación, sino eliminación" (pág. 216), pero sus objeciones a Austin son –salvo en tres de las casi setenta páginas que dedica al tema– marginales a tal exigencia. Los especialistas en la cuestión encontrarán atractivo ese examen de la teoría de Austin.

De los ensayos semánticos, "Significado y verdad" es el que se enfrenta a cuestiones de mayor alcance (¿en qué consiste que una expresión, una señal, una acción tengan significado?); pero es también el que más defrauda. Strawson contrapone los dos enfoques que al respecto han privado durante los últimos veinte años, el de los teóricos de la intención comunicativa (Austin, Grice)

y el de los teóricos de la semántica formal (Frege, Davidson). Para los primeros, no es posible decir en qué consiste que una palabra o una oración tengan significado sin recurrir a la intención comunicativa de los hablantes; para los segundos, las reglas que especifican el significado de unas y otras se limitan a asignar denotaciones (valores referenciales) a los elementos (semánticamente) atómicos del lenguaje y condiciones de verdad a las oraciones formadas a partir de esos átomos. Strawson está en el primero de esos bandos. La concepción de la intención comunicativa se encuentra, por un lado, incomparablemente mejor expuesta y elaborada que su rival. De hecho, "Intención y convención en los actos de habla", uno de los más creativos y profundos ensayos de la recopilación, puede considerarse una contribución real a dicha concepción, al mostrar cómo el concepto pragmático de fuerza inlocutiva puede entenderse a partir de la noción griceana de significado no-natural. Pero la teoría contraria es difícilmente reconocible en las páginas de Strawson. (Su breve alusión a la teoría que Tarski desarrolló acerca del concepto semántico de verdad es completamente desafortunada.) Por otro lado, y reconociendo que ambas concepciones tienen puntos de vista en común, la argumentación de Strawson a favor de que el aparato conceptual de la teoría de la intención comunicativa contiene recursos suficientes para fundamentar la teoría rival está muy lejos de ser convincente. La estrategia de Strawson consiste en hacernos ver que la noción de verdad es ininteligible sin la de acto de habla *via* la de enunciar o hacer un enunciado. Todo depende, entonces, de "algo incontrovertido y bastante general sobre la verdad": "Alguien hace un enunciado o aserción verdadero si y sólo si las cosas son, al hacer el enunciado, como él enuncia que son" (pág. 206 y s.). Sin embargo, frente a lo que pretende Strawson, este algo incontrovertido no tiene que ver tanto con la verdad cuanto con en qué consiste *hacer* un enunciado (o *enunciar* algo) verdadero. Desde luego, hay aquí una referencia a un acto de habla –el de enunciar–, pero no es una referencia que se extraiga del análisis, sino puesta por él.

"Gramática y filosofía" es otra cosa. Se ocupa de semántica en la medida en que la cuestión que se debate en él –a saber: cómo incorporar a los modelos generativo-transformacionales de análisis gramatical la exigencia de que las relaciones y funciones definidas en el nivel sintáctico reflejen relaciones y funciones más básicas de naturaleza lógico-semántica– puede considerarse así. Strawson sostiene que, en este punto, la filosofía puede prestarle buenos servicios a la teoría gramatical, investigando modelos lingüísticos simplificados en los que se ensayen pautas para colmar la laguna que existe entre ambos componentes de la gramática. A estos modelos los llama Strawson modelos de *gramática perspicua*. Ciertamente que este ensayo tiene un carácter puramente programático, y que esa idea de gramática perspicua es muy nebulosa. Sin embargo, justamente en este punto los ensayos lógico-semánticos de la recopilación vienen a servir de complemento a esta tesis de "Gramática y filosofía", ya que en ellos se explora algunos de los temas que incluiría esa teoría de una gramática perspicua (como lo son los temas de la referencia y de la predicación). De estos temas, el de las funciones de sujetos y predicados es el que tiene un interés mayor para la lingüística de corte tradicional. Al mismo tiempo, permite ilustrar con claridad la tesis de Strawson de que las categorías gramaticales (=sintácticas) tienen capacidad explicativa cuando se las ve ligadas a categorías semánticas y lógicas. En "Términos singulares y predicación", por ejemplo, Strawson se ocupa del vínculo entre las funciones de sujetos y predicados, las categorías lógicas de término singular y término general y, en segundo lugar, de la correspondencia entre éstas y las categorías ontológicas de lo particular y lo general (es decir, de entidad localizable espacio-temporalmente o análoga a las de esta índole en algún respecto, de un lado, y de aquello de lo que un particular puede ser una instancia).

De estos ensayos lógico-semánticos, "La asimetría de sujetos y predicados" es, casi con seguridad, el que un lingüista encontrará más dentro de su ámbito de competencia. Strawson analiza en él la tesis de que lo que diferencia a los predicados de los sujetos es que sólo los primeros, cuando se los niega, dan lugar a la negación de las oraciones que los contienen como tales predicados. Sin embargo, *medio* ensayo consigue su objetivo sólo si estamos dispuestos a aceptar que si *negamos el sujeto* de 'O Tomás o Guillermo son altos' obtendremos la oración 'Ni Tomás ni Guillermo son altos'. El problema estriba en que esa noción de negación del sujeto de una oración Strawson no la explica por ningún lado y que ese "sentido claro e intachable en el que la negación *tiene que* considerarse con los sujetos putativos" es una incógnita para el lector. De hecho, las relaciones lógico-semánticas entre esas dos oraciones puede explicarse sin recurrir a la ampliación de la doctrina de la asimetría.

"Sobre el referir" y "Referencia identificadora" son los grandes atractivos de esta recopilación. Son ensayos que han dejado una huella profunda en el género de investigación semántica que lógicos y filósofos han cultivado desde los tiempos de Frege (y aún antes) y que han supuesto –sobre todo el primero de los dos– un punto de inflexión dentro de la filosofía del siglo. Ambos tratan de la naturaleza de la relación referencial. Strawson sostiene en ellos que la referencia no es tanto una relación entre signos y cosas, como se ha supuesto desde Frege y Saussure, cuanto una función del *uso* del lenguaje. No hay referencia; sólo hay referir... Y esa función del referir puede realizarse siempre que se satisfagan ciertos requisitos previos, al igual que sucede con otros actos de habla. Armado de una premisa así, Strawson se enfrenta a la doctrina russelliana de la descripciones y a sus consecuencias. Seguramente que el hecho de esta doctrina haya sido –y siga siendo– considerada el paradigma del Análisis Filosófico ha contribuido al renombre de los ensayos de Strawson. Decir sólo esto, sin embargo, no le haría justicia a Strawson, que ha escrito aquí algunas de las primeras páginas de esa reciente disciplina lingüística que es la Pragmática. Si bien los lingüistas estarán casi siempre del lado de la polémica en el que se encuentran Strawson, éste reconoce que tanto el punto de vista de Russell (según el cual los términos de referencia vacía hacen falsas las oraciones que los contienen) como el suyo propio (según el cual no las hacen ni verdaderas ni falsas, puesto que se violan ciertos prerrequisitos del referir) reflejan, en buena medida, intereses distintos. Quizá sea justo añadir, a la vista del concepto de gramática perspicua, que esta diferencia de intereses es lo que Strawson tiene en cuenta cuando afirma que ese programa de investigación en lingüística no-empírica "recordará en algunos aspectos al establecimiento de lenguajes ideales por los lógicos; pero el propósito será menos restringido que el de los lógicos" (pág. 165). Quien quiera hacerse una idea exacta de la diferencia de alcance de unas y otras estrategias, hallará en los ensayos de Strawson ideas profundas y que merecen un cuidadoso estudio. (J. J. A.)

HANDBOOK OF STOCHASTIC METHODS, por C. W. Gardiner. Springer-Verlag; Berlín, 1983. Nos avisa el autor en el prefacio que su "intención al escribir este libro ha sido presentar, con

un lenguaje relativamente simple y en una forma razonablemente deductiva, todas esas fórmulas y métodos que se encuentran dispersos en la literatura científica sobre métodos estocásticos, a través de los ochenta años en que han sido usados". Y tiene razón cuando habla de dispersión. Es difícil encontrar otro campo dentro de las ciencias experimentales en el que las matemáticas hayan ido tan separadas (tan avanzadas sería mejor decir) respecto a las ideas y aplicaciones de la física, química, genética, ecología, sociología y economía. Durante muchos años los matemáticos que trabajaban en procesos estocásticos han hablado, salvo pocas y honrosas excepciones, un lenguaje distinto, y distante, del que usaban los científicos empeñados en la aplicación de los conceptos estocásticos a los fenómenos naturales. Esta situación ha dado lugar a la dispersión antes mencionada, al faltar una estructura formal y un recetario que permitieran una utilización cómoda y sistemáica de las técnicas y teoremas.

Aun cuando en los últimos veinte años hemos asistido a un importante esfuerzo por aproximar ambos niveles, abstracto y aplicado, descubriéndose la utilidad práctica de numerosos resultados matemáticos, resulta siempre interesante la aparición de monografías que traten, como el libro de Gardiner, de poner juntos fórmulas y métodos. La función primordial de un libro que se ofrece como "manual" es la de introducir en la cuestión, pero aquí Gardiner no acierta a cubrir todas las expectativas despertadas. El libro es excesivamente complicado en el desarrollo de los temas, de forma que resulta más útil al que ya conoce los métodos (al que le ofrece una visión nueva de algunos puntos), que al que se acerca por primera vez a ellos.

Los primeros capítulos se dedican a establecer el marco matemático necesario. Se introducen los conceptos fundamentales de la teoría de probabilidades (cap. 2), los procesos de Markov (cap. 3) y las ecuaciones diferenciales estocásticas (cap. 4), poniendo énfasis en la diferencia entre las integrales de Ito y de Stratonovich. De la ecuación diferencial estocástica se pasa a la ecuación de Fokker-Planck, ecuación en derivadas parciales para la densidad de probabilidad condicional del proceso considerado, a la que se dedica un largo capítulo (cap. 5). Son de destacar el análisis de condiciones de contorno, el estudio del tiempo de transición entre estados, que, en el caso unidimensional, puede calcularse analíticamente, y un valioso, por detallado, estudio de la ecuación de Fokker-Planck multidimensional, cuya solución estacionaria requiere el cumplimiento de severas condiciones (balance detallado).

La dificultad en encontrar soluciones exactas, salvo en casos muy sencillos, hace particularmente necesario el desarrollo de métodos aproximados. En el capítulo 6 se analizan dos: el desarrollo perturbativo, útil cuando el carácter estocástico del problema viene controlado por un parámetro pequeño, y la eliminación adiabática de variables rápidas, que permite, cuando puede realizarse, reducir la dimensionalidad del problema original hasta límites en que los métodos analíticos, u otros métodos aproximados, puedan ser usados. Ambos métodos tienen la desventaja de ser particulares; en general, el carácter estocástico no tiene por qué ser una simple perturbación de la evolución determinista y, en problemas con varias variables, no siempre existen escalas de tiempo tan distintas que permitan una eliminación de variables rápidas.

Por otro lado se echa a faltar una mención de los métodos aproximados de aplicación cuando hay ruido real, no blanco. La importancia de considerar tales procesos, se ha reconocido recientemente y se han desarrollado métodos aproximados para tratar tales problemas. Sorprende, pues, que un texto que pretende ser un compendio de métodos no aluda, ni siquiera de pasada, a ninguno de ellos.

Habiendo estudiado con algún detalle los procesos continuos de fusión, el capítulo 7 atiende a los procesos discontinuos, adecuados para describir fenómenos en los que las variables relevantes cambian "a saltos", es decir, por valores enteros, tal como ocurre, por ejemplo, en ecología. Se introduce la *ecuación central*, una ecuación en diferencias finitas, y se analiza la posibilidad de aproximarla por una ecuación de Fokker-Planck, que involucra cambios continuos en la variable. El desarrollo sistemático debido a Van Kampen (*Stochastic Processes in Physics and Chemistry*, North-Holland; Amsterdam, 1981) se presenta como el único coherente, aunque no se mencionan sus límites de aplicabilidad y utilidad.

El capítulo 8 se detiene en el estudio estocástico de problemas no homogéneos, es decir, con dependencia espacial, tema de actualidad en investigación donde los resultados matemáticos (la teoría de las ecuaciones diferenciales estocásticas en derivadas parciales) son muy escasos y de rara o nula utilidad práctica, por lo que el análisis detallado de algunos ejemplos sencillos puede servir de base adecuada para una investigación más profunda. El tratamiento aquí es cuidado y completo.

El contenido del libro se cierra con un corto capítulo sobre cuestiones de biestabilidad, metaestabilidad y problemas de escape, continuación y ampliación de temas ya tratados en anteriores capítulos, y un análisis breve de la aplicación de los procesos estocásticos a algunas cuestiones de mecánica cuántica.

Hay una sección de "referencias" excesivamente escueta para un libro de estas pretendidas características y otra de bibliografía comentada donde el lector podrá encontrar las obras fundamentales sobre este campo. Globalmente considerado, el libro resulta razonablemente completo (no es el propósito del autor, como avanza en el prólogo, presentar de manera exhaustiva todos los métodos existentes). Pero el trabajo cumple mejor la función de libro de consulta para el experto en el campo que para quien se acerca buscando la aplicación más o menos inmediata a su problema particular. (F. J. R. y M. G. V.)

EPITOME DE LA BIBLIOTHECA ORIENTAL Y OCCIDENTAL, NÁUTICA, Y GEOGRÁFICA, de Don Antonio de León Pinelo. Edición y estudio introductorio por Horacio Capel; 2 vols. Ediciones de la Universidad de Barcelona; Barcelona, 1982. Nos hallamos ante la edición facsímil del *Epitome* de Antonio León Pinelo, según la versión corregida y generosamente aumentada que Andrés González de Barcia publicase en 1737. Sobre su origen e interés baste aquí recordar un texto del "Proemio a esta segunda edición": el duque de Medina de las Torres había encargado a Leon Pinelo una "Lista de Libros de Indias (...) para añadir noticia Histórica, à Ciencia Politica de aquel Nuevo Mundo". La "biblioteca" finalmente ofrecida por el acreditado conocedor de los negocios de América, de sus tierras, sus leyes y costumbres desbordaría ampliamente los límites de aquella propuesta inicial. En efecto, rebuscando en muy notables bibliotecas y contando con el apoyo estatal, León Pinelo presentó una de las más importantes contribuciones europeas al conocimiento de la bibliografía geográfica y la primera biblioteca especializada sobre el Nuevo Mundo. Este canto de cisne de nuestro renacimiento en el estudio histórico-científico de la superficie del globo no ha perdido toda su vigencia y sigue siendo pieza fundamental para el

conocimiento de nuestro pasado cultural.

Publicada en 1629, la decadencia del seiscientos impediría que fuera objeto de las ampliaciones y correcciones que requería. Sólo un siglo más tarde, mediante el uso que de ella hicieron Nicolás Antonio y otros, fue retomada en un momento de gran interés. Finalizada la Guerra de Sucesión, comienza a partir de los años veinte una nueva etapa en la historia de la ciencia española. Tras los años de polémicas novatoras, a veces más buena voluntad que realizaciones concretas, se inicia una fase de lenta y firme difusión de los nuevos saberes con un importante respaldo de la corona. La nueva dinastía se muestra decidida a crear en torno a ella una clase culta. Se muestra interesada, como ha reconocido P. Vilar, en una política de proteccionismo y dirigismo intelectual que a través de variadas instituciones apoye el resurgimiento de la vida social, cultural y económica española. Las dificultades para concretar este compromiso en el ramo de las ciencias serán mayores que en otros sectores de la actividad intelectual. Afirma López Piñero que, pese a todo, el coste social que hubo de pagar España hasta asumir las nuevas ciencias fue muy elevado; en su opinión tuvo que renunciarse a la brillante tradición científica de nuestro quinientos. Esta importante tesis, sin embargo, ha comenzado a ser revisada por otros autores como J. L. Abellán, M. Grice-Hutchinson, J. Vilar o en este caso Horacio Capel. La nómina citada coincide por una u otra razón en que esa tradición no quedó bruscamente cortada y que, en todo caso, se hicieron notables esfuerzos para que el acercamiento no fuese "... en rebusca de mitos o de utopías hacia el pasado, más que con el deseo de un conocimiento objetivo y veraz de los hechos". A propósito de la transición desde el barroco a la ilustración, José M.ª Maravall justifica el hecho de que en las humanidades el proceso de institucionalización de los nuevos saberes desde supuestos claramente modernos se realizase con tanta celeridad, a diferencia de lo que había ocurrido en relación a las ciencias, de la manera siguiente: la importancia de las cuestiones históricas, jurídicas, lingüísticas o políticas a resolver era de tal envergadura que ello debía dar cuenta suficiente del mayor interés de la corona por las humanidades.

Tal vez la tesis del profesor López Piñero sólo sea aplicable en los acercamientos de la primera ilustración en saberes tales como la medicina, astronomía o matemáticas. Sea como fuere, lo que intenta demostrar H. Capel en su documentado estudio introductorio es que "... la lectura de obras de finales del XVII y de todo el XVIII nos muestra una y otra vez la presencia de esa tradición, la cita repetida de autores del Renacimiento y de la primera mitad del XVII. Más aún, puede afirmarse que por parte de un buen número de intelectuales existió un esfuerzo consciente en el reinado de Felipe V para que esa tradición hispana no se interrumpiese, y para que el proceso de modernización del país se realizara sin olvido del pasado" (pág. IX). A pesar de todo, no creemos que este importante tema, debido a la ausencia de otros estudios previos, pueda quedar definitivamente resuelto. Parece como si el debate en torno al punto de partida de nuestra ilustración (Marañón, Sarrailh, Mestre, V. Peset, Quiroz-Martínez, Ceñal...) comience a desplazarse hacia la cuestión de sus orígenes y fuentes (López Piñero, Capel, Abellán, J. Vilar,...).

Con la aparición del *Epitome*, afirma su nuevo editor, los marinos y geógrafos españoles disponían de la más importante biblioteca geográfico-náutica de Europa. ¿Por qué en 1737 vuelve a reimprimirse generosamente ampliada y actualizada? Andrés González de Barcia, "Algebrista de la Lengua" en la recién creada Academia Española, era un excelente conocedor de la literatura, legislación e historia indiana. Su compromiso con los ideales de modernidad era claro. Después del fracaso diplomático español en el tratado de Utrecht, nuestra política exterior toma un decidido horizonte atlántico. Defender flotas, monopolio y costas de la agresividad de las potencias presentes en el Caribe, exigía un enorme esfuerzo en la construcción de buques, fortificación de plazas y formación especializada de oficiales. Los primeros ministros de Felipe V sabían que ello no habría de ser suficiente. Junto al interés por el presente colonial, se presentaba también de modo acuciante una necesidad de comprender el pasado "... porque la historia –nos dice H. Capel, p. XIX– podía facilitar asuntos para defender más eficazmente el Imperio". No es preciso recordar a este respecto los problemas de España con Francia en la Luisiana, o con Portugal, Holanda e Inglaterra desde las Antillas hasta el Brasil. Los tiempos habían cambiado, pero no tanto para que perdiesen vigencia las palabras que con clarividente pluma escribiera Juan Rodríguez de León, hermano de Antonio, en su "Discurso Apologético" a la edición de 1629: "... que como de las Indias solo se apetece Plata, i Oro, estan sus Escritores tan olvidados, como sus Historias poco vistas: siendo ocupación Estrangera, la que debiera ser natural de España; i assi de nuestras mismas Conquistas saben mas las Plumas agenas, que las Curiosidades propias". No es extraño que Barcia dedicase la obra al marqués de Torre Nueva "del Consejo de su Magestad, y su Secretario de Despacho Universal de Hacienda, Indias y Marina... y Presidente de la Junta de Comercio, y Moneda" a quien esta biblioteca habría de interesar sobremanera, ni la consagración a Felipe V a quien suplica protección para las nuevas ciencias. Las mil citas de la edición de León Pinelo son transformadas por González de Barcia en más de quince mil. Los errores e imprecisiones, tal vez provocados por su precipitada impresión, no empañan la oportunidad y enorme interés de la reedición aquí comentada. La bella publicación de la Universidad de Barcelona –sobre ejemplar que se conserva en su biblioteca– y la magnífica introducción de H. Capel nos permiten darle con entusiasmo la bienvenida. (J. L. P. y A. L.)

BETWEEN ORTHODOXY AND THE ENLIGHTENMENT: JEAN-ROBERT CHOUET, AND THE INTRODUCTION OF CARTESIAN SCIENCE IN THE ACADEMY OF GENEVA, por Michael Heyd. (International Archives of the History of Ideas, 96.) Martinus Nijhoff/The Magnes Press, Hebrew University, 1982. No se puede decir, de la revolución científica, que sea una *terra incognita* para el historiador. Antes bien, hemos de hablar ya de generaciones de intérpretes, escuelas y escoliastas: seguidores de Pierre Duhem, o corriente según la cual los "recientes", "novadores", "neotéricos" y demás modernos hundían sus raíces en la Edad Media, y partidarios de la ruptura, cuyos últimos defensores podríamos representar en A. Rupert Hall e I. B. Cohen. Unos y otros, sin embargo, hilvanan un mismo continuo, que arranca de Copérnico y prosigue, en retahíla, con Galileo y Newton. Nombre más, nombre menos, añádase Kepler, Huygens, Bacon, Descartes, Boyle, Hooke, por si acaso. Con lo que ellos representan: la mecánica en física, la geometría en epistemología y la observación experimental como método. Para que el cuadro quede completo, háblese de la formación de grupos –las academias, siempre regias– y los medios de comunicación entre los mismos: *Transactions, Acta Eruditorum, Journal des Sçavans*, etcétera. Abrase la

mano, no mucho, y que se cuele de rondón la química y la medicina; sobre todo, no se nos olvide Harvey y recordemos, sin mayor emoción, a Vesalio.

Más que una visión elitista de la historia de la ciencia, *whig* que dirían los anglosajones, lo que se nos viene dando machaconamente es una visión inglesa: los males de la cultura premoderna arrancan del Aristóteles mediterráneo y todos los bienes de la nueva ciencia lo son por su mirada hacia la Royal Society. De ahí, por contraste, la frescura de la obra de Heyd sobre Jean-Robert Chouet y la introducción del cartesianismo en la Academia calvinista de Ginebra. (Un libro que ha recibido merecidos plácemes, alguno augurándole doscientos años de vida.) Un personaje de segunda fila, discreto profesor de filosofía, logra romper la intransigencia aristotélica de un teologado protestante de estricta observancia. Las artes de que se vale remedan las de nuestros escépticos: no es lo suyo la interpretación de las Escrituras sino la libertad de filosofar, saca la enseñanza del recinto académico y aviva el interés por la experimentación ante una mayor audiencia. En treinta años escasos, Ginebra se convierte, con Leyden, en uno de los principales centros editoriales del mundo. Chouet y Tournes serán, de aquella, dos nombres de garantía de la obra.

El autor nos lleva a esa fase a través del método del caso aplicado a la historia. Es decir, no se trata de asignar al protagonista la labor única y decisiva, sino de contemplar, a través suyo, la gestación, la confluencia de corrientes, el movimiento político, económico y social del entorno y hasta las pendencias estudiantiles. [Al español escarmentado por persecución de eramistas y pietistas quizá no le asuste la labor inquisidora –en su fe, por supuesto– de Francis Bacon, pero a lo mejor le convenga conocer las "providencias" tomadas por la iglesia calvinista de Ginebra, Burdeos, el Delfinado y Montpellier contra Deschamps, sospechoso de cartesianismo (págs. 168-169). Valga ello para denunciar el simplismo con que se suele despachar nuestra falta de figuras.] Heyd se hace eco de la explicación habitual dada a ese tránsito de la ortodoxia a la ilustración: la secularización de la ciencia, que, según el momento histórico, llamamos paso del mito al logos, de la escolástica a la filosofía moderna, quiebra de la postura geocéntrica, disolución analítica de la filosofía y ocaso del antropocentrismo. Heyd se hace eco y razona la explicación en diversos frentes, como el mismo desplazamiento de las preferencias del alumnado por carreras menos especulativas.

Todos los países no eslavos tienen historiada la expansión en sus confines del cartesianismo. Entre nosotros hay dos obras fundamentales, la de Ramón Ceñal y la de Olga V. Quiroz-Martínez, de la década de los cuarenta ambas, que necesitan un nuevo replanteamiento (no la mera perífrasis). Pero lo que aquí me importa destacar es la universal propagación de la obra de Descartes. Quizá la razón más obvia, pero no la menos importante, sea que Europa estaba preparada para su recepción. ¿De qué manera? Desde Paracelso, la alquimia había ido introduciéndose en las reboticas de los apotecarios y sus preparaciones reclamadas por los médicos. (El trabajo de José M.ª López Piñero sobre Llorens Coçar es punto de referencia obligado por lo que a nuestro país concierne.) Los cuatro elementos, más la quinta esencia, se redujeron a tres. Se rompió la simetría cuaternaria. Los axiomas aristotélicos –lógicos o físicos– eran puestos en cuestión: los primeros por los escépticos, los segundos por los químicos, que, en la mayoría de los casos, eran los mismos. "...

Percioche con tal'arte [la alquimia] si solvono i metalli, si calcinano le pietre, si fanno le acque, si cavano gli olii, si separano gli elementi"; escribía Leonardo Fioravanti. La calcinación, dirán paralelamente los atomistas, pone en evidencia los últimos elementos de la materia: ni formas sustanciales, ni materia prima, ni privación. Con ese tejido químico-médico, alejado muchas veces de las universidades, que hace caso omiso del hilemorfismo oficial, la duda metódica y el mecanicismo no es más que un cauce de expresión sistematizado. Tejido que viene a ser el trampolín de la nueva física. (L. A.)

Curso de Química Técnica, por J. Costa López, S. Cervera March, F. Cunill García, S. Esplugas Vidal, C. Mans Teixidó y J. Mata Alvarez. Editorial Reverté; Barcelona, 1984. La más somera observación de la realidad industrial descubre el espectacular avance de la tecnología química. La química técnica se define como "la parte de la ciencia química cuyo objetivo es concebir, calcular, diseñar, hacer construir y hacer funcionar la mejor instalación donde llevar a cabo un proceso químico cualquiera".

Un grupo de profesores del Departamento de química técnica de la Universidad de Barcelona han plasmado su labor docente en este libro, que se inicia con un desarrollo histórico de la química técnica en el contexto del avance general de la sociedad y llega hasta la contaminación y la crisis energética. Introducen el concepto de operaciones unitarias y, posteriormente, el de fenómenos de transporte. En un análisis pormenorizado de este panorama químico se abordan los modelos teóricos: balances macroscópicos y microscópicos, leyes de equilibrio y de velocidad. A continuación se estudian algunas operaciones unitarias como aplicación de estos modelos. El libro, para demostrar la utilidad práctica de los conceptos expuestos, extiende su aplicación a la economía, optimación, control y otros. Procede de acuerdo con el siguiente esquema didáctico: justificación del tema, ejemplo real, deducción de las ecuaciones generales y aplicación a casos concretos. Cada capítulo termina con una relación de ejercicios y la obra se cierra con una actualizada selección bibliográfica.

En el prólogo leemos la razón de ese proceder: "en cada capítulo se han intercalado ejercicios resueltos que sirven de ejemplo para la introducción de los correspondientes conceptos. Se han elegido siempre de forma que sean de dificultad matemática mínima y, por tanto, el aparato matemático no distraiga ni enmascare el objetivo del ejercicio. En la deducción de las distintas ecuaciones de balance, etc., se ha seguido también y por idénticas razones el mismo criterio: mínimo desarrollo matemático".

En el primer capítulo, además del desarrollo histórico de los procesos químicos, se describe el influjo de los actuales sobre el medio ambiente y se introduce el concepto de operación unitaria. Las operaciones unitarias se desarrollan en el segundo capítulo: clasificación, operaciones unitarias físicas controladas por la transferencia de materia, por la transmisión de calor, por el transporte de la cantidad de movimiento, y la operación unitaria química.

Los balances macroscópicos de materia y energía, tanto en estado estacionario como en estado no estacionario y los de cantidad de movimiento son los temas abordados en los capítulos 3, 4 y 5. El sexto se ocupa de los modelos teóricos empleados en química técnica para estudiar los fenómenos de transporte. En el capítulo siguiente los autores se centran en el balance microscópico de materia: perfiles de concentración en régimen laminar y régimen turbulento y coeficientes individuales de transferencia de materia. El balance microscópico de la cantidad de movimiento y los perfiles de velocidad en regímenes laminar y turbulento y el balance de energía mecánica se exponen a lo largo del capítulo 8. El capítulo 9 trata de la transmisión de calor en los sólidos y en los fluidos, de la conducción, de la convección y de la radiación. Finalmente, en el capítulo 10, se profundiza en la estrategia de sistemas: análisis y síntesis de procesos, análisis del modelo matemático de un sistema de proceso, análisis económico, optimación y control de procesos químicos.

La originalidad del libro que comentamos aflora en muchas páginas. Para demostrar esta aseveración citaremos la introducción del concepto de operaciones unitarias como aplicación de ejemplos reales en un texto de fenómenos de transporte, la ubicación de los "procesos químicos" al principio, así como la confección de una "introducción a los modelos teóricos de los fenómenos de transporte", en el centro del programa, a modo de puente de unión entre balances macroscópicos y balances microscópicos. Merece la pena destacar, por su originalidad, la variante gráfica del método de McGabe-Thiele, sugerido para diseñar columnas de rectificación, y la deducción de la ecuación de Bernouilli a partir del concepto de entropía (P. M.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA POBLACION CHINA

RESEARCH ON THE POPULATION OF CHINA: PROCEEDINGS OF A WORKSHOP. Dirigido por Robert J. Lapham y Rodolpho A. Bulatao. Committee on Population and Demography, Assembly of Behavioral and Social Sciences, National Research Council; 1981.

POPULATION TRENDS IN CHINA AND INDIA. Ansley J. Coale en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 80, n.º 6, págs. 1757-1763; marzo, 1983.

POPULATION AND BIRTH PLANNING IN THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. En *Population Reports*, Series J, n.º 25; vol. 10, n.º 1, págs. J-577-J-618; enero-febrero de 1982.

ON THE RESULTS OF THE CHINESE CENSUS. Li Chengrui en *Population and Development Review*, vol. 9, n.º 2, págs. 326-344; junio, 1983.

EL YACIMIENTO PALEONTOLOGICO DE CULLAR DE BAZA-I

LE SITE PRÉHISTORIQUE NOUVEAU DE CULLAR DE BAZA-I D'ÂGE PLÉISTOCÈNE MOYEN. ETUDE PRÉLIMINAIRE ET ANALYSE DE LA FAUNE DES RONGEURS. A. Ruiz Bustos y J. Michaux en *Géologie Méditerranéenne*, tomo III, páginas 173-182; 1976.

LAS CONDICIONES ECOLÓGICAS DEL MUSTERIENSE EN LAS DEPRESIONES GRANADINAS. LA FAUNA DE MICROMAMÍFEROS EN LA CUEVA DE LA CARIGÜELA (PIÑAR, GRANADA). A. Ruiz Bustos y M. García Sánchez en *Cuadernos de Prehistoria*, n.º 2, págs. 7-17; Universidad de Granada, 1977.

EL YACIMIENTO DE VERTEBRADOS DE CORTES DE BAZA-I (DEPRESIÓN DE GUADIX-BAZA). A. Ruiz Bustos, J. A. Peña y J. Rodríguez en *Acta Geológica Hispánica*, tomo XII, n.º 1/3, págs. 42-45; 1977.

LES CONGLOMÉRATS DE LA «BLOCKFORMATION» ET LEUR SIGNIFICATION DANS L'EVOLUTION NÉOGÈNE DU BASSIN DE GRENADE (CORDILLÈRES BÉTIQUES, ESPAGNE). A. Ruiz Bustos y C. J. Dabrio en *C. R. Soc. Géol. Fr.*, fasc. 2, págs. 53-55; 1979.

ORBITA TERRESTRE Y PERIODOS GLACIALES

VARIATIONS IN THE EARTH'S ORBIT: PACEMAKER OF THE ICE AGES. J. D. Hays, John Imbrie y N. J. Shackleton en *Science*, vol. 194, n.º 4270, páginas 1121-1132; 10 de diciembre de 1976.

ICE AGES: SOLVING THE MYSTERY. John Imbrie y Katherine Palmer Imbrie. Enslow Publishers; 1979.

MILANKOVITCH AND CLIMATE CHANGE. Dirigido por J. Imbrie y A. Berger. Elsevier Science Publishing Co., Inc.; 1984.

PROTEINAS DE MEMBRANA

THREE-DIMENSIONAL MODEL OF PURPLE MEMBRANE OBTAINED BY ELECTRON MICROSCOPY. R. Henderson y P. N. T. Unwin en *Nature*, vol. 257, n.º 5521, págs. 28-32; 4 de septiembre de 1975.

STRUCTURE OF THE JUNCTION BETWEEN COMMUNICATING CELLS. P. N. T. Unwin y G. Zampighi en *Nature*, vol. 283, n.º 5747, págs. 545-549; 7 de febrero de 1980.

MEMBRANE PROTEIN STRUCTURE. R. Henderson en *Membranes and Intercellular Communication; Les Houches Session XXXIII, July 30-August 30, 1979*, dirigido por Roger Balian, Marc Chabre y Philippe F. Devaux. Amsterdam North-Holland Publishing Co., 1981.

ESPECTROSCOPIA DE GASES SOBREENFRIADOS

SUPERSONIC NOZZLE BEAMS. James B. Anderson, Ronald P. Andres y John B. Fenn en *Advances in Chemical Physics*, vol. 10, págs. 275-317; 1966.

LASER SPECTROSCOPY IN SUPERSONIC JETS. D. H. Levy, L. Wharton y R. E. Smalley en *Chemical and Biochemical Applications of Lasers*, dirigido por C. Bradley Moore. Academic Press; 1977.

MOLECULAR OPTICAL SPECTROSCOPY WITH SUPERSONIC BEAMS AND JETS. Richard E. Smalley, Lennard Wharton y Donald H. Levy en *Accounts of Chemical Research*, vol. 10, n.º 4, págs. 139-145; abril, 1977.

NUMEROS Y MEDIDAS EN LOS PRIMEROS DOCUMENTOS ESCRITOS

METROLOGICAL RELATIONS IN A GROUP OF SEMI-PICTOGRAPHIC TABLETS OF THE JEMDET NASR TYPE, PROBABLY FROM URUK-WARKA. J. Friberg en *Research Report n.º 1979-15*. Departamento de Matemáticas, Chalmers Tekniska Högskola, Goteborg, 1979.

A SURVEY OF PUBLICATIONS ON SUMERO-AKKADIAN MATHEMATICS, METROLOGY AND RELATED MATTERS (1854-1982). J. Friberg en *Research Report n.º 1982-17*. Departamento de matemáticas, Chalmers Tekniska Högskola, Goteborg, 1982.

ABEJAS SOLITARIAS

THE SOCIAL BEHAVIOR OF THE BEES: A COMPARATIVE STUDY. C. D. Michener. Harvard University Press; 1974.

EVOLUTION OF INSTINCT: COMPARATIVE ETHOLOGY OF HYMENOPTERA. Kunio Iwata. Editado por Amerind Publishing Co., para la Smithsonian Institution y la National Science Foundation; Nueva Delhi, 1976.

LA INVENCION DEL GLOBO AEROSTATICO Y EL NACIMIENTO DE LA QUIMICA

THE CHEMICAL REVOLUTION: A CONTRIBUTION IN SOCIAL TECHNOLOGY. Archibald Clow y Nan L. Clow. Batchworth Press; London, 1952.

THE HISTORICAL BACKGROUND OF CHEMISTRY. Henry M. Leicester. Dover Publications, Inc.; 1971.

A BOOK REVIEW OF AN EARLY (1781) SURVEY OF PROGRESS IN CHEMISTRY. Arthur F. Scott en *Survey of Progress in Chemistry*, vol. 8, páginas 253-277; 1977.

JUEGOS DE ORDENADOR

MINDSTORMS: CHILDREN, COMPUTERS, AND POWERFUL IDEAS. Seymour Papert. Basic Books, Inc.; 1980.

TURTLE GEOMETRY: THE COMPUTER AS A MEDIUM FOR EXPLORING MATHEMATICS. Harold Abelson y Andrea A. diSessa. The MIT Press; 1980.

TALLER Y LABORATORIO

WHY THE BLUE ARCS OF THE RETINA ARE BLUE. Carl R. Ingling, Jr., y Bruce A. Drum en *Vision Research*, vol. 17, págs. 498-500; 1977.

THE EFFECT OF HUMMING ON VISION. H. A. K. Mastebroek y J. B. van der Kooi en *Physics Education*, vol. 14, págs. 253-254; 1979.